

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
Отделение материаловедения

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Определение параметров электрического взрыва проволок для получения однородных смесей микро и наночастиц сплавов 316L и TiAl

УДК 669.018-426:537.521-047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Самарканов Фархат Жанатович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения материаловедения	Лопаткин С.А.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально - гуманитарных наук	Старикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения контроля и диагностики	Ахмеджанов Р.Р.	д.б.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

Томск – 2018 г

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	Способность <i>совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Способность <i>использовать иностранный язык в профессиональной сфере</i> .
P3	Способность применять на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении</i> коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности
P4	Способность использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием <i>современных информационных технологий</i> ; синтезировать и критически резюмировать информацию.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P5	Способность применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Способность <i>ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
P7	Способность выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Способность выполнять инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Способность проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Способность проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Способность осваивать <i>новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Способность разрабатывать <i>рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; <i>составлять оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Самарканову Фархату Жанатовичу

Тема работы:

Определение параметров электрического взрыва проволок для получения однородных смесей микро и наночастиц сплавов 316L и TiAl

Утверждена приказом директора (дата, номер) № 1799/с от 15.03.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы: 09 июня 2018 года

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Исходными данными к работе являются литературные данные, данные анализов нанопорошков, полученных методом электрического взрыва проводника в газовых средах. Полученные образцы сплава 316L и TiAl исследуются методами рентгеноструктурного анализа, электронной и растровой микроскопии, а также методом распределения частиц по размерам
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	- Литературный обзор (Характеристики процесса электрического взрыва проводника); - Определение параметров электрического взрыва проводника для получения смесей микро- и наночастиц сплава 316L и TiAl с заданными параметрами; - Определение параметров ГИТ для получения порошков металлов методом ЭВП;

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Моделирование сепарации частиц в сепарационном узле с заданной конструкцией;</li> <li>- Обработка данных результатов рентгеноструктурного анализа порошков, а также анализа электронной и растровой микроскопии;</li> <li>- Проведение экспериментов с использованием установки по получению порошков металлов;</li> <li>- Заключение и выводы по работе.</li> </ul>
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация в Microsoft PowerPoint

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Екатерина Васильевна
Социальная ответственность	Ахмеджанов Рафик.Равильевич.
Разделы, выполненные на иностранном языке	Квашнина Ольга Сергеевна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:** 1 State of the art technologies for producing metal alloys based products; 2 Subjects of study and methods of research; 3 Determination of electrophysical parameters of the preparation of mixtures of micro- and nanoparticles by means of EEW; 4 Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент; 5 Социальная ответственность

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	22 января 2018 г.
---	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Лопаткин Сергей Анатольевич	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Самарканов Фархат Жанатович		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
 Уровень образования: магистр  
 Отделение материаловедения  
 Период выполнения: 2017/2018 учебный год

Форма представления работы:

магистерская диссертация
--------------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08 июня 2018 г.
--	-----------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10/11/2017	Изучение литературных источников по теме исследования	20
12/01/2018	Моделирование сепарации частиц в сепарационном узле установки по получению порошков металлов	30
29/03/18	Экспериментальное определение параметров электрического взрыва проводника для получения однородных смесей микро- и наночастиц стали 316L и сплава TiAl	30
17/05/18	Финансовый менеджмент	5
20/05/18	Социальная ответственность	5
25/05/18	Разделы, выполненные на иностранном языке	10
		Сумма: 100 баллов

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Лопаткин Сергей Анатольевич	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит: 131 страницу, 51 рисунок, 26 таблиц, 68 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: СТАЛЬ 316L, СПЛАВ TiAl, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ ПРОВОДНИКА, НАНОПОРОШОК, ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ, ЧАСТИЦЫ.

В качестве объектов исследования выступали порошки стали 316 L и сплава TiAl на основе смеси микро и наночастиц.

Цель работы – определить условия формирования однородных смесей на основе микро - и наночастиц сплавов 316 L и  $\gamma$ -TiAl при электрическом взрыве проволоки сплава 316L и совместном электрическом взрыве проволок Ti и Al.

Синтезированные образцы исследовались с помощью современных аналитических методов (рентгенофазовый, электронная микроскопия, распределение частиц по размерам и др.)

Полученные образцы имеют нормально-логарифмическое распределение частиц по размерам. С увеличением вводимой энергии, средний размер частиц в образцах уменьшается. Изменение вводимой энергии в проволоки энергии в исследованном интервале, не приводит к изменению фазового состава образцов.

Степень внедрения: экспериментально – промышленная установка.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: производительность установки 0,2 кг/ч с частотой взрывов около 1,5 Гц.

## Определения

- Нанопорошок (от англ. nanopowder), согласно определению Международной организации по стандартизации, нанопорошок – твердое порошкообразное вещество искусственного происхождения, содержащее нанообъекты, агрегаты или агломераты нанообъектов либо их смесь;

- Электрический взрыв проводника – резкое изменение физического состояния металла в результате интенсивного выделения в нем энергии при пропускании импульсного тока большой плотности ( $j \geq 10^6$  А/см<sup>2</sup>), приводящее к нарушению металлической электропроводности и сопровождающееся разлетом продуктов диспергирования, генерацией ударных волн и электромагнитного излучения;

- Пассивация металлов – переход поверхности металла в неактивное, пассивное состояние, связанное с образованием тонких поверхностных слоёв соединений, препятствующих коррозии. В технике пассивацией называют технологический процесс защиты металлов от коррозии с помощью специальных растворов или процессов, приводящих к созданию оксидной плёнки;

- Фаза – под фазой понимается однородная макроскопическая часть системы, обладающая одинаковыми свойствами - по крайней мере, составом (компонентами) и агрегатным состоянием - во всех ее точках, и имеющая четко выраженную границу раздела с другими фазами;

- Наночастица (от англ. nanoparticle) – изолированный твёрдофазный объект, имеющий отчётливо выраженную границу с окружающей средой, размеры которого во всех трех измерениях составляют от 1 до 100 нм [1].

## **Сокращения:**

- ЭВП – электрический взрыв проводника;
- НП – нанопорошок;
- РСА – рентгеноструктурный анализ;
- ТА – термический анализ;
- ЭМ – электронная микроскопия;
- АМ – технологии – технологии аддитивного производства (от англ. additive manufacturing);
- ПК – Персональный компьютер;

## Table of contents

Introduction	11
1 STATE OF THE ART TECHNOLOGIES FOR PRODUCING METAL ALLOYS BASED PRODUCTS	12
1.1 Additive technologies for producing metal alloys based products	12
1.2 Characteristics of powders used in additive technologies	15
1.2.1 Requirements for characteristics of powders used in additive technologies	15
1.2.2 Influence of bimodal particle size distribution in metal alloy powders on the properties of the final material	16
1.2.3 Methods for powder production	18
1.3 Production of Nano-Micro Particles using Electrical Explosion of Wires	22
1.3.1 Description of the electrical explosion of wires by using the conductor process	22
1.3.2 Dependence of the particle size distribution on the EEW parameters	23
1.3.3 Concepts for the EEW process implementation	25
1.4 Purposes and subjects of the study	27
2 SUBJECTS OF STUDY AND METHODS OF RESEARCH	28
2.1 Subjects of study	28
2.1.1 Austenitic phase of 316L – steel	28
2.1.2 Titanium aluminides and their alloys	30
2.2 Methods of research	31
2.2.1 Nanopowder production setup description	31
2.2.2 Determination of generator parameters based on short-circuit tests	32
2.2.3 Transmission electron microscopy (TEM) and scanning electron microscopy (SEM) methods description	34
2.2.4 Description of the X-ray diffraction analysis method	37
2.3 Mathematical simulation of particle separation	40
3 DETERMINATION OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF THE PREPARATION OF MIXTURES OF MICRO- AND NANOPARTICLES BY MEANS OF EEW	41
3.1 Calculation of the particles trajectories	41
3.1.1 Calculation of the particles trajectories with dimensions of 100 nm – 10 $\mu$ m	41
3.1.2 Calculation of the particles trajectories with dimensions of 10 $\mu$ m – 100 $\mu$ m	44
3.2 Parameters of electric explosion of 316L alloy wire and joint electric explosion of two interlaced Ti and Al wires	47
3.3 Producing and studying the structural-phase state of samples of mixtures of micro- and nanoparticles of 316L and Ti-Al alloys	50
4 РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ	59
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	59
4.2 Расчет бюджета для научно-технического исследования	68
4.3 Оценка рисков научно – технического исследования	72
4.4 Анализ и оценка научно-технического уровня исследования	73
4.5 Оценка ресурсоэффективности проекта	75

5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	81
5.1	Производственная безопасность	81
5.1.1	Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования	81
5.1.2	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований	93
5.2	Экологическая безопасность	96
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	97
5.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	101
	Conclusion	104
	Bibliography	105
	Приложение А – Impulse current generator parameters calculation	112

## **Introduction**

Currently, additive technologies are widely implemented in various industries. This stimulates the development of powders producing methods, which are building materials in additive technologies. Promising materials for additive technologies are homogeneous mixtures of powders based on micro- and nanoparticles. The usage of powders based on mixtures of micro- and nanoparticles allows to reduce the sintering temperature of particles, to increase density and to reduce surface roughness of the product obtained by the additive technology method.

A promising method for producing powders based on homogeneous mixtures of micro and nanoparticles is the electric explosion of wires (EEW). Method is based on the explosive destruction of a wire as a result of passage of a current pulse with densities of  $(10^6 - 10^8)$  A/cm<sup>2</sup>. It is possible to produce powders based on micro and nanoparticles changing the amount of energy introduced into a wire.

This study is devoted to the determination of the parameters of electric explosion synthesis of powders based on mixtures of micro- and nanoparticles of 316 L and  $\gamma$ -TiAl alloys. Increasing application of these alloys takes place in additive technologies due to corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant properties. Information is lacking on producing of these materials by a EEW method.

The purpose of this study is to determine conditions for the formation of homogeneous mixtures based on micro- and nanoparticles of 316 L and  $\gamma$ -TiAl alloys in the electric explosion of a 316L alloy wire and the joint electric explosion of Ti and Al wires.

# **1 State of the art technologies for producing metal alloys based products**

## **1.1 Additive technologies for producing metal alloys based products**

The «three-dimensional printing» technology saw the light of day in the late 80-ies of the last century. «3D Systems» company is the pioneer in this field, which developed first commercial stereolithographic machine - SLA - Stereolithography Apparatus (1986). First laser machines - first stereolithographic (SLA machines), and then powder (SLS-machines), were excessively expensive, variety of model materials was very modest. Widespread use of digital technologies in the field of computer-aided design (CAD), modeling and calculation (CAE) and machining (CAM) has stimulated the rapid nature of the 3D-printing technologies development.

International community has not yet established classification of additive technologies. Various authors subdivide them [1]:

- by applied constructional or model materials (liquid, loose, polymeric, metal-powder, etc.);
- by the presence or absence of a laser;
- by methods of energy injection to fix the layer of construction (by utilizing heat, exposure to ultraviolet or visible light, by means of a binder, etc.);
- by layer formation methods.

The latter factor distinguishes two types of additive technologies. First type: a layer is formed, for example, by pouring a dose of powder material onto the working platform and the powder is leveled with a roller or «knife», thereby creating an even layer of material of a certain thickness. Then powder in the formed layer is selectively treated by a laser or in another way, fastening the powder particles (fusing or gluing) in accordance with the current cross section of the original CAD model. This technology is called «Bed Deposition» (figure 1), assuming that there is a certain platform - Bed, on which a layer is formed, and then material is selectively solidified. Construction plane position is constant. Part of the constructional material, in this case – metal powder, remains untouched in the created layer. This technology corresponds

to the term «selective synthesis» or «selective laser sintering», if layer is solidified by a laser [2].

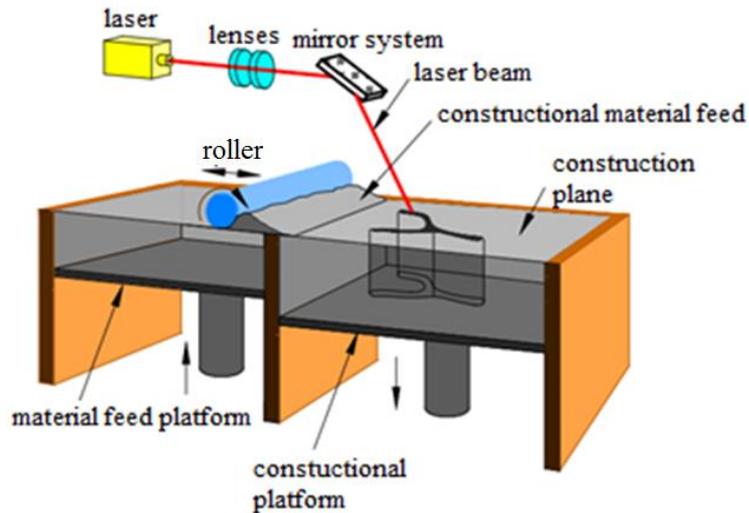


Figure 1 – Bed deposition [2]

The second type of additive technologies is Direct Deposition (figure 2), i.e. deposition of material directly to the point where energy is injected and where the detail fragment is currently being built. Unlike the first type, a layer of constructional material is not formed, and the material is fed to specific location, where at a given time energy is injected and where the process of solidification is going [2].

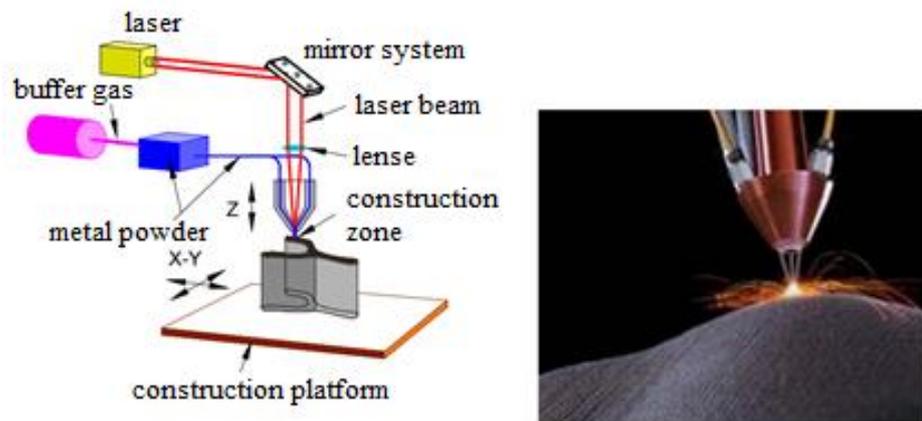


Figure 2 – Direct deposition [2]

In addition to mentioned SLS- and SLA-technologies, bed deposition includes such well-known technologies as [2]:

- SLM - Selective Laser Melting (SLM Solutions, Germany);
- DMLS - Direct metal laser sintering (EOS, Germany);

- EBM - Electron Beam Melting (Arcam, Sweden);
- LaserCUSING (Concept Laser, Germany);
- SPLS - Solid Phase Laser Sintering (Phenix Systems, France);
- Ink-Jet or Binder jetting (ExOne, 3D Systems, USA) and a number of others.

Direct deposition type includes the following technologies [2]:

- DMD - Direct Metal Deposition (POM, USA);
- LENS - Laser Engineered Net Shape (Optomec, USA);
- DM - Direct Manufacturing (Sciaky, USA);
- MJS - Multiphase Jet Solidification (Fraunhofer IFAM, Germany, FDM,

USA), etc.

ASTM has returned to the question of terminology, definitions and classification several times, and in the last, 2012-year version, classifies additive technologies as follows, dividing them into seven categories: material extrusion, material jetting, binder jetting, sheet lamination, vat photopolymerization, powder bed fusion, and directed energy deposition [1].

A common feature of technologies using a radiant heat source is the need to use special supports – «anchors» that keep the constructing product from thermal deformations.

Mass production of products of complex geometry, made of special materials is widely represented in the aviation industry, space industry, power engineering and a number of other industries. Additive manufacturing technology is being used as an alternative to traditional technological methods for the production of complicated details. The reason for this is economic feasibility. In many cases additive technologies are less expensive than traditional ones [3].

Russian company «NIAT NTK» has successfully completed project of replacing the welded fuel injectors of the aircraft engine with injectors, made of nickel alloy CL 100NB utilizing AM technology (figure 3). The result is significantly reduced rejects percentage, and the weight of the product is reduced by 17%. There is also a positive experience with the use of AM technology for expensive products repair, for example,

working bodies of GTE turbines, shafts (figure 3), as well as for application of protective and wear-resistant coatings (DMD, LENS technology) [4].



Figure 3 - Aircraft engine parts restoration [4]

AM technologies are also used in traditional foundries. For example, a mold can be constructed with cooling channels of complex configuration, which can not be done with conventional machining methods. POM, Omtomec and Fabrisonic AM-machines are successfully used for the manufacture of molds with copper cooling cores, as well as with the so-called conformal cooling system, the configuration of which corresponds to the geometry of the molded part [5].

Layer by layer constructing method gave new opportunities, opened up new horizons for design engineers, made it possible to overcome many technological limitations. It is possible to make «item in the item», the item can be constructed with varying thickness of the material (so called gradient material). It's now possible to make mesh structures in one piece, which is impossible to obtain by molding or machine processing. These are fundamental advantages of additive technologies, which determine their role in modern material production.

## **1.2 Characteristics of powders used in additive technologies**

### **1.2.1 Requirements for characteristics of powders used in additive technologies**

Powders are bulk materials with a size of particles up to 1,0 mm. Powders are subdivided according to the particle size (according to the nominal diameter  $d$ ) into

nanodispersed particles with  $d < 0,001 \mu\text{m}$ , ultradisperse –  $d = (0,01 - 0,1) \mu\text{m}$ , finely divided  $d = (0,1 - 10) \mu\text{m}$ , small  $d = (10 - 40) \mu\text{m}$ , medium -  $d = (40 - 250) \mu\text{m}$  and large ones -  $d = (250 - 1000) \mu\text{m}$  [6].

Currently, there are no general requirements for metal powder compositions used in AM-technologies. Different manufacturers of AM machines work with a specific list of materials, usually supplied by the company itself. Different machines use powders of different fractional composition. One of the parameters characterizing powder is the  $d_{50}$  quantity - "average particle diameter". For example,  $d_{50} = 40 \mu\text{m}$  means that in 50% of the powder particle size is less than or equal to  $40 \mu\text{m}$ . So, in Phenix Systems machines powder with  $d_{50} = 10$  microns is used; For Conzept Laser machines, dispersion of powder lies in the range of  $(25 - 52) \mu\text{m}$  at  $d_{50} = 26,9 \mu\text{m}$ ; for Arcam the particle size is 45-100 microns, for SLM Solutions machines  $d_{50} = (10 - 30)$ , etc. [7].

A special feature of the laser synthesis process, for example, in SLM technology, is that laser beam not only fuses the powder particles, forming the body of the object, but also "spoils" the material adjacent to the surface of the part. Therefore, in practice of using SLS-machines, waste material sieving methods are used in order to remove the «defective» powder. In what proportion - each company decides in its own way. Thus, the identity of samples built on the same machine using the same powder, but given these nuances, is also not guaranteed.

A common requirement for powders used AM machines is the spherical shape of the particles. This is due to the fact that such particles fit more compactly into a certain volume. And it is necessary to ensure the «fluidity» of the powder composition in the material supply systems with a minimum resistance [8].

### **1.2.2 Influence of bimodal particle size distribution in metal alloy powders on the properties of the final material**

In several studies, the influence of the bimodal particle size distribution in metals on material properties is considered (316L steel) [9, 10]. Homogeneous mixture of micro and nanoparticles allows to provide better mechanical properties of products

obtained during the consolidation of powders. Increased demand for high-complicity parts in powder metallurgy led to the active use of nanopowders. Particles of nanopowders have dimensions in the range from 1 to 100 nm.

Main advantages of nanopowders are the lower melting point and the smoother surface of particles compared to micro-particle powders. However, due to the fact that nanoscale particles have a large specific surface area, they are easily combined into agglomerates and have greater friction between the particles, which complicates their further use. Nanopowder fraction is characterized by the presence of a larger oxide phase compared to the powders of micron-sized particles, which is the reason for the formation of pores and undesirable inclusions in products made of such powders. The use of powders with exclusively micro-sized particles has its drawbacks, one of which is the need to achieve high material quenching temperatures values during powder consolidating.

These disadvantages can be eliminated by using a mixture with a bimodal particle size distribution (nano / micro). Such mixture has a higher packing density, because particles of a smaller size fill the space between larger particles (figure 4) [9, 10]. External pressure broke the bonding between nano- and micropowders, and nanopowder filled the interparticle space of micropowder. Powder with bimodal nano / micro particles ratio of 25:75 showed the highest relative density in the whole pressure range.

The fact that the grains of nanostructured (NS) and fine-grained (UFG) alloys have a size distribution was presented in experimental results of studies [11 - 15]. As it turned out, grain size distribution influences the behavior of alloys under compression, tension and elongation. For example, an increase in breakage growth resistance is registered in Al-Mg alloys with a bimodal grain size distribution, as a result of microcracks deflection at the boundaries between UFG and coarse-grained zones. But the improvement of the properties of metal alloys takes place only if a certain percentage of a certain grain type is observed.

Possible possibilities of improving the mechanical and anticorrosive properties of Fe-Cr-Ni-based metal alloys by means of bimodal distribution of alloy particles sizes are indicated [16].

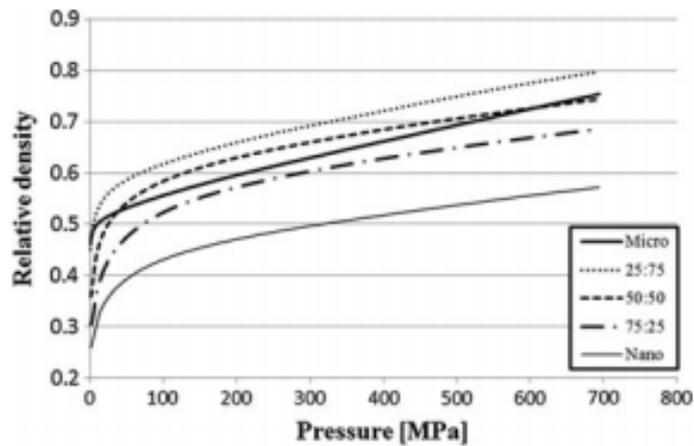


Figure 4 - Relative density variation of powders with different ratios of particle sizes (micro/nano) with respect to pressure change [9]

### 1.2.3 Methods for powder production

The production of metal powders, despite the variety of methods, is the most laborious and expensive stage of the technological process. Physical, chemical and technological properties of powders, the shape of the particles depends on their production method.

There are many methods for producing metal powders, conditionally they are divided into physico-chemical and mechanical. Physicochemical refers to technologies associated with the physical and chemical transformations of the feedstock. However, the chemical composition and structure of the final product - powder, is significantly different from the starting feedstock.

Mechanical methods ensure the production of powder out of raw materials without a significant change in their chemical composition. Mechanical methods include, for example, numerous grinding options in mills, as well as melts dispersing by a gas or liquid jet. This process is also called atomization [17].

Particles of powders obtained by mechanical methods have a fragmented, irregular shape. Manufactured powder contains a relatively large amount of impurities.

Therefore, these methods are not used to produce powders used in additive technologies.

Melt dispersion is widely used in the production of powders of multicomponent alloys, in particular with an amorphous structure that allows to achieve an even chemical composition, even with a content of doping components above their solubility limit in the main component of the alloy. The main technologies for obtaining powders by this method are:

- Gas atomization;
- Vacuum atomization;
- Centrifugal atomization.

According to the gas atomization technology, metal is melted in the melting chamber (usually in a vacuum or inert medium) and then drained in controlled mode through a special device - a sprayer, where the flow of liquid metal is destroyed by a stream of inert gas under pressure. To obtain fine powders  $d = (10 - 40) \mu\text{m}$ , most often used in additive technologies, so-called VIM-atomizers (Vacuum Induction Melting) are used in which the melting chamber is evacuated to minimize melt contact with oxygen and nitrogen. Technology of obtaining powders with the use of vacuum melting machines is called VIGA - Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization (figure 5) [18].

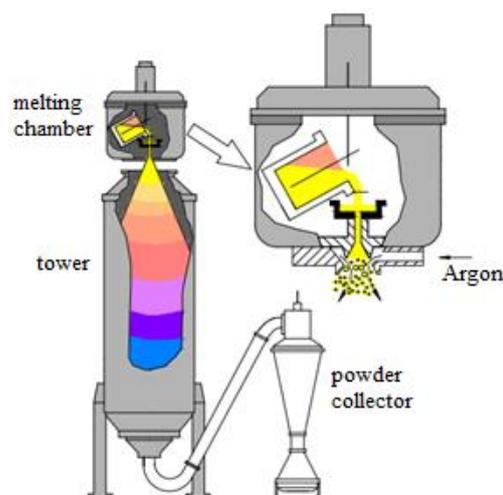


Figure 5 – VIGA atomizer scheme [18]

The process of vacuum atomization is often called soluble gas atomization [19, 20], i.e., atomization due to a gas dissolved in the melt (figure 6). Atomizer consists of two chambers – melting chamber at the bottom, and spraying - at the top. In the melting chamber, an excess pressure of the gas (hydrogen, helium, nitrogen) is created, which dissolves in the melt. During atomization metal goes up to the nozzle apparatus, and then into the spray chamber, where a vacuum is created. Resulting differential pressure induces dissolved gas to come to the surface of the melt droplets and «explodes» the droplets from the inside, ensuring a spherical shape and a finely dispersed structure of the powder.

Rotating electrode process (REP) technology (figure 7) involves spraying a melt created by an electric arc between a rod of material (usually diameter from 15 – to 75 mm) and a tungsten electrode. The main advantage of this method is complete elimination of melt contact with the crucible, bottling devices, which takes place, for example in VIM technology or in the centrifugal spraying on a rotating disc [19, 20].

Methods based on impulse processes with high rates of change in the thermodynamic parameters of the substance are also used to produce nanoparticles. One of these methods is the electrical explosion of a wire (EEW). EEW is implemented when a current pulse passes through a metal wire with a density of  $(10^6-10^9) \frac{A}{cm^2}$ . The wire heats up to the melting point, melts, and then explodes.

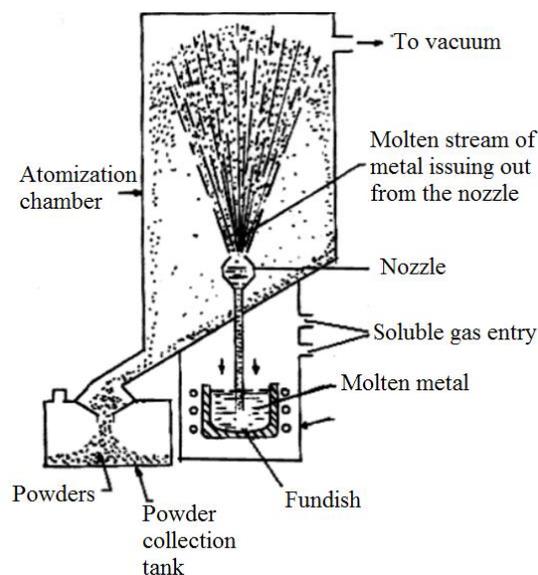


Figure 6 - Soluble gas atomization process scheme [20]

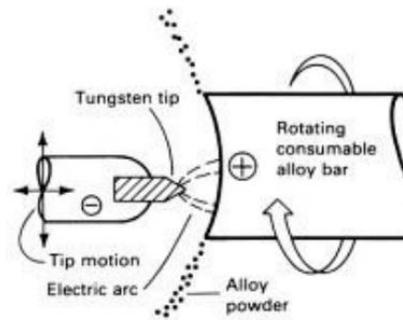


Figure 7 – REP process scheme [20]

When the products of the explosion expand into the gas atmosphere, nanoparticles are formed. Compared to physical methods EEW-technology has several advantages [21]:

1 Energy costs are lower than in other methods known to us for the production of spherical metallic nanoparticles. This is due to the fact that in EEW technology, energy is injected into the metal impulsively and volumetrically, rather than from the surface, so the energy consumption for heating the environment is relatively low.

2 The possibility of fine and flexible control of the parameters of the technological process and thus the properties of the obtained powders.

3 Obtaining of a wide range of nanopowders of any metals and alloys that are produced or can be made in the form of wire or foil. In some cases, it is possible to blow molten metal jets.

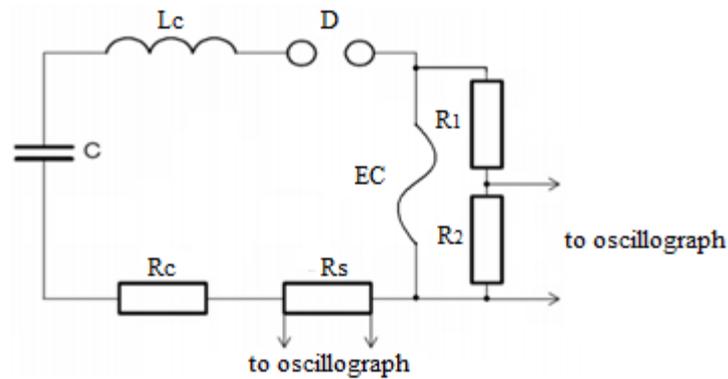
4 The possibility of obtaining particles of metals with high physical and chemical activity, which cannot be provided by other technologies.

5 EEW method has economic advantages too, due to low cost of equipment, its simplicity, and small weight and size of the equipment. The prices for aluminum powders (90 – 110) nm for amount of 1 kg fluctuate between 540\$ and 586\$ whereas price for usual metal (aluminum) is approximately 2\$ per kilogram. [21, 22].

### 1.3 Production of Nano-Micro Particles using Electrical Explosion of Wires

#### 1.3.1 Description of the electrical explosion of wires by using the conductor process

Schematic diagram of the discharge circuit of the setup for the EEW implementation is shown in figure 8 and represents a pulse current generator.



C - capacitor;  $L_C$  - inductance of the circuit; D - discharger; R1, R2 - high-voltage divider;  $R_S$  - shunt;  $R_C$  - resistance of the circuit; EC - exploding conductor.

Figure 8 - LC circuit for EEW implementation [23]

In most cases capacitors (C) are used as a power source, which is charged to the required voltage level ( $U_0$ ). Depending on the purpose, more complex circuits can be used, such as pulse voltage generators, pulse current generators, storage lines, etc. The switch (D) is usually a controlled discharge device that provides a quick supply of voltage to the exploding conductor (EC). As an exploding conductor a piece of metal wire with a determined diameter and length is used.

To determine EEW energy parameters, oscillographic measurement of the current in the electrical circuit (using a current shunt or Rogowski belt) and voltage on the exploding conductor (using a voltage divider) are used.

Figure 9 shows typical oscillograms of current and voltage for EEW process.

When capacitor is discharged, an impulse current flows through a conductor, which heats up to the melting temperature (time instant -  $t_1$ ). Melting of the metal on the voltage oscillogram is manifested as a voltage jump in the time interval  $t_1 - t_2$ , caused by an increase in the resistivity of the wire.

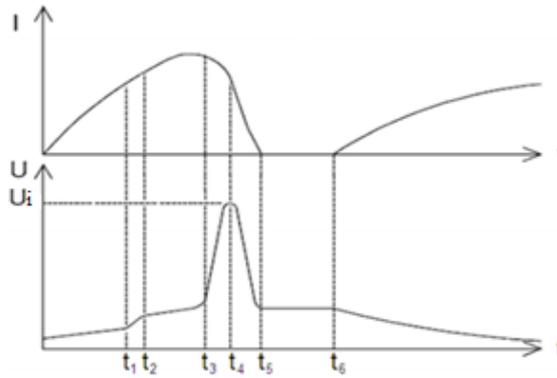


Figure 9 - Oscillograms of current and voltage during EEW [23]

Then metal heats up in the liquid state. At the moment  $t_3$  the process of destruction begins, conductor loses its continuity, its resistance begins to grow rapidly, the current in the chain decreases. As a result of a sudden increase in resistance, an overvoltage impulse ( $U_{OV}$ ) is formed on the discharge gap, amplitude of  $U_{OV}$  can several times exceed the charging voltage of the capacitor ( $U_0$ ). The maximum value of the overvoltage factor ( $k = U_{OV} / U_0$ ), according to the published studies, can reach 18 [24, 25]. The time  $t_4$  corresponding to the maximum of the overvoltage peak is considered by the authors of many works as the moment of the actual explosion of the conductor [26, 27], however, in [28],  $t_5$  is considered as an explosion moment. After  $t_4$ , current decreases to zero and at the instant  $t_5$  a current pause occurs due to the low electrical conductivity of the explosion products, which have the properties of gas with high electrical strength. With the expansion of explosion products, electrical strength of the gap decreases and at the instant  $t_6$  residual voltage on the capacitor leads to a breakdown of the products, arc stage of the EEW begins.

### 1.3.2 Dependence of the particle size distribution on the EEW parameters

A study of the particle size distribution of the powder particles (figure 10) has shown that at a low energy level of the capacitor battery charge, particles have a bimodal distribution, with a maximum of the first peak at 30 nm and the second at 70 nm. An increase in the charge energy of the capacitors leads to a narrowing of the first peak of the particle distribution and a shift of its maximum towards smaller diameters, the second peak of the distribution gradually disappears.

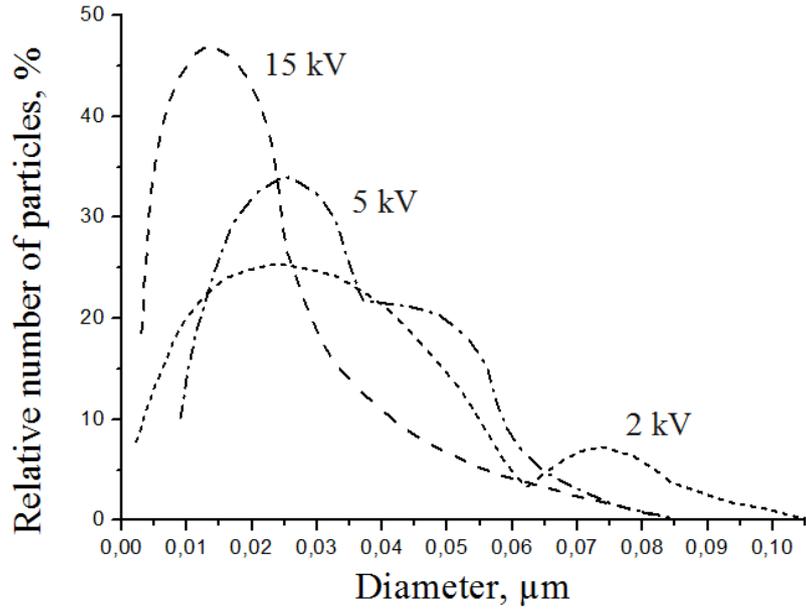


Figure 10 - Dependence of the particle size distribution on the voltage level of the capacitor battery charge. Uranium EEW,  $C = 20 \mu\text{F}$  [28]

In subsequent studies, the influence of the energy introduced into the conductor during the explosion was investigated in more detail. The author of [28] established that the average diameter of particles produced by electric explosion of conductors with high electrical conductivity (Al, Cu, Ni) is related to the specific energy input into conductor by following equations:

$$\begin{cases} \bar{a} = 0,5 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{e}{e_s}\right)^{-0,5} \cdot \frac{e}{e_s} > 2 \\ \bar{a} = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{e}{e_s}\right)^{-3} & 0,7 \leq \frac{e}{e_s} \leq 2,1 \end{cases} \quad (1)$$

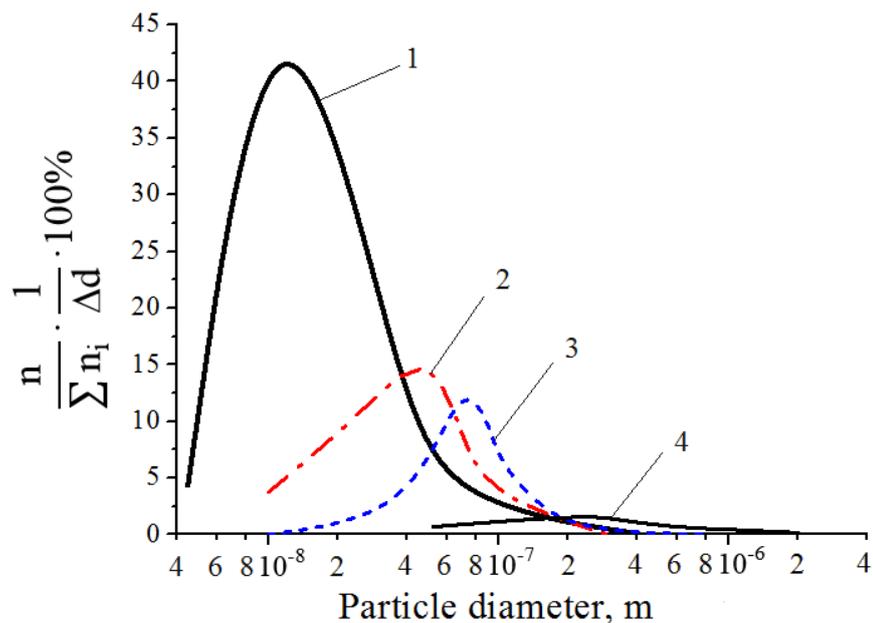
where  $\bar{a}$  - mean diameter calculated using the particle size distribution histogram;

$e$  - specific energy introduced into conductor during explosion;

$e_s$  - specific energy of sublimation of the exploding material.

This dependence is valid in all modes of EEW, if the energy released in the arc discharge is less than 50% of the total energy stored in the capacitors. At an energy value  $e/e_s > 2$ , the dispersion of the powder is determined, mainly by the particles

condensation from the vapor. With a decrease of energy, the particles are formed both by condensation of the vapor and by dispersion of the liquid metal. With a decrease in  $e/e_s$  ratio, the process of a liquid metal dispersing becomes more and more important. When introduced into conductor energy was changed in [28], a change not only in the characteristic size of the particles, but also in the particle size distribution function form was observed. At an energy  $e < 0.7e_s$ , conductor dissociates into droplets, the particle size distribution lies in the region from 10  $\mu\text{m}$  to 1 mm. With the increase in the energy introduced into conductor, the second maximum appears in the distribution in the range from 10 nm to 1  $\mu\text{m}$ , corresponding to the formation of a condensation aerosol. With further increase in energy, most of the metal evaporates, the number of coarse particles and their sizes decrease, distribution becomes unimodal, narrower and shifts to a smaller range (figure 11).



1 -  $e/e_s = 2,1$ ; 2 -  $e/e_s = 0,7$  (ultrafine fraction); 3 -  $e/e_s = 1,5$ ; 4 -  $e/e_s = 0,8$

Figure 11 - Particle size distribution of the conductors obtained in the explosion of Cu in air [28]

### 1.3.3 Concepts for the EEW process implementation

In study [29] the concept of the most typical setup for nanopowders production by the method of EEW is shown. When the system is in operation (figure 12), wire 3

is fed from section 6 towards electrode 2. High voltage is applied to the wire and an explosion occurs. Under the action of the explosion energy, explosion products, expanding, begin their movement towards the cooler section 4. Passing through the cooler, the temperature of the explosion products is reduced to 20°C. The products of the explosion continue their movement in the separator 5, where large particles are separated. The wire continues to move and the process repeats. Under the influence of the dynamic forces generated during the explosion of the wire and the predominant circulation of the gas stream, the explosion products continue to move along the plant circuit and are deposited in the filter 7, accumulate and fall into the beaker 8. Then, the gas, mostly purified from the explosion products, enters the cyclone 11, in which the "rolling" of particles not deposited in the filter occurs. From the cyclone, the gas passes the cooler 12 and returns to the reactor 1. The fan 9 provides the necessary gas velocity in the cyclone 11. The frequency of the installation is at least 1,5 Hz with an aluminum nanopowder productivity of at least 0,2 kg / h.

To obtain nanopowders of metals in bulk quantities, the following process parameters are usually used:

1 diameter of the exploding conductor  $d_0 = (0,20 - 0,45)$  mm;

2 the relative energy content of the exploding conductor (overheating)  $E/E_C = (0,5 - 2,5)$  ( $E$  is the energy introduced into the conductor,  $E_C$  is the sublimation energy of the metal), is determined from the oscillograms of the discharge current;

3 The pressure of the gas atmosphere (argon), in which the explosion occurs  $P = (300 - 500)$  kPa;

4 The temperature of the gas atmosphere  $T = (10 - 60)$  °C [29].

Literature review has shown that existing setups designs of the implying the possibility of separating particles of submicron size [30, 31]. When energy less than the energy of its sublimation introduced into a wire, the content of particles of micron sizes increases in the products of the explosion [32]. Under such conditions, an actual task in producing powders based on micro- and nanoparticle mixtures is separation of micron-sized particles in order to extract a micron fraction with a determined dispersion composition, which determines the quality of the relief of the resulting parts.

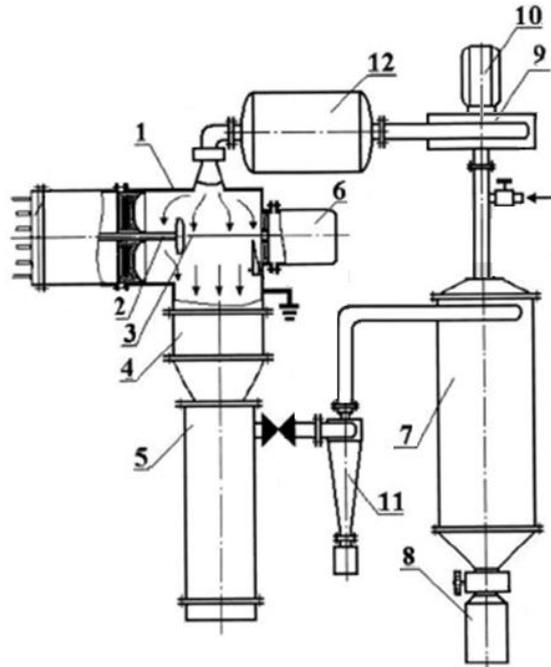


Figure 12 – Basic scheme of a EEW setup

#### 1.4 Purposes and subjects of the study

Literature review has shown that the main EEW parameter, which determines the average size of the produced particles, is the amount of energy introduced into a wire. With decreasing energy, the average particle size and a micron fraction content in the resulting samples increase.

In order to achieve the stated purpose of the study, it is necessary to accomplish the following tasks:

- to establish the particle separation regularities for a given geometry of the separation unit on change of particle size and the flow rate of the buffer gas;
- to determine electrical explosion parameters of the 316L alloy wire and the joint electric explosion of two interlaced Ti and Al wires to produce powders based on homogeneous mixtures of micro- and nanoparticles;
- to establish regularities of changes in the structural-phase state of particles as a function of the parameters of electrical explosion of wires.

## **2 Subjects of study and methods of research**

### **2.1 Subjects of study**

The subjects of study are powders of 316L steel and TiAl alloy based on a mixture of micro and nanoparticles. The choice of these materials is conditioned by a wide range of their applications in industry. Powders of 316L steel were obtained by electrical explosion of the wire of the corresponding alloy in an argon atmosphere ( $2 \cdot 10^5$  Pa). TiAl alloy powders were obtained by electric explosion of two interlaced titanium and aluminum wires in an argon atmosphere ( $2 \cdot 10^5$  Pa). The ratio of metals in the TiAl alloy was set by the ratio of wires' diameters and was  $\approx 50/50$  at. %. This ratio corresponds to the high-temperature resistant  $\gamma$ -TiAl phase.

#### **2.1.1 Austenitic phase of 316L – steel**

The introduction of nickel in 17% chromium steel transforms it into an austenitic state over the entire temperature range, which provides better mechanical properties, less grain growth propensity, and also makes the steel more corrosion-resistant and not frost-bfracturable (316L steel) [30].

Phase formation condition in stainless chromium-nickel alloys is represented by the Fe-Cr-Ni system.

Figure 13 shows a horizontal section at  $650^\circ\text{C}$  of the Fe-Cr-Ni system (solid lines). Single-phase  $\gamma$ - and  $\alpha$ -regions are separated by a two-phase  $\gamma + \alpha$  region. If the chromium content is more than 20%, the  $\sigma$  phase (FeCr chemical compound) appears. The position of the two-phase region  $\gamma + \alpha$  depends on the temperature. With temperature decrease below  $650^\circ\text{C}$ , the  $\gamma + \alpha$  region goes to the right and its extreme position at  $20^\circ\text{C}$  is shown by the dotted lines ending at points c and g, and as the temperature rises the region goes to the left and its position at  $1100^\circ\text{C}$  show dotted lines, terminating at points a and d [34].

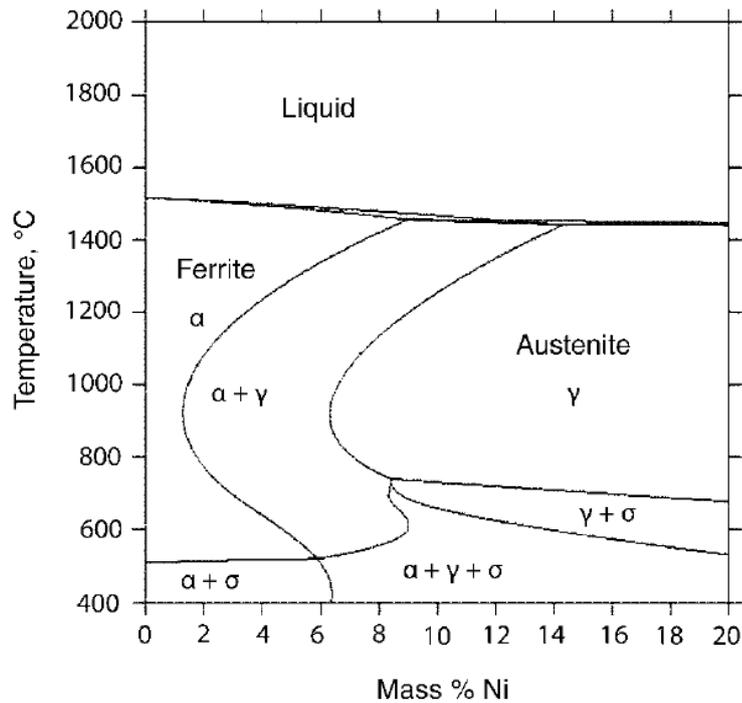


Figure 13 – Iron-nickel phase diagram at 18% chromium [33]

Hence, alloys lying below the abc line have a ferrite structure at room temperature. Between the lines abc and defg, semi-ferritic (or semi-austenitic) alloys are enclosed. Alloys lying to the left of the de-ferritic line, and to the right of ig-austenitic [34].

Majority of the publications about selective laser melting (SLM) of ferrous metals consist of experiments with usage of 316L stainless steel, which has the following properties:

- One of the indicators of the SLM parts quality is relative density. Most of the SLM steel or iron-based materials based on 316L alloy have shown relative densities above 90% [35].
- Steel is often used because of its strength.
- One of the limitations of the SLM process is the surface roughness and it is common to achieve roughness of about 20 μm. Post processing, such as sandblasting, shot-peening, or manual grinding is often needed to achieve a smooth and shiny surface with the exception for 316L stainless steel. Kruth et al. published a biocompatible metal framework for dental prostheses and Wehmoller et al. reported body implants of

cortical bone, mandibular canal segment, and support structures or tubular bone made from SLM 316L stainless steel. As do most AM technologies, SLM provides the freedom of design to make conformal cooling channels and this is especially applicable to injection moulding. The ability of SLM to create complex lattice structures has also led to research in cellular lightweight structures. In most of these works, 316L stainless steel has been used [35, 36].

### 2.1.2 Titanium aluminides and their alloys

In the Ti-Al system, intermetallic compounds  $Ti_3Al$  ( $\alpha_2$ - phase) and  $TiAl$  ( $\gamma$ - phase) are formed on the titanium side, with significant homogeneous regions (figure 14) [37].

Alloys based on  $\gamma$ -TiAl are considered as the most promising intermetallics for use in jet engine building from the engineering point of view [37]. Austenitic TiAl alloys have high strength characteristics, low weight due to low density and heat resistance in the temperature range up to  $1450^\circ C$  (figure 14), in contrast to other phases of the titanium and aluminum alloys.

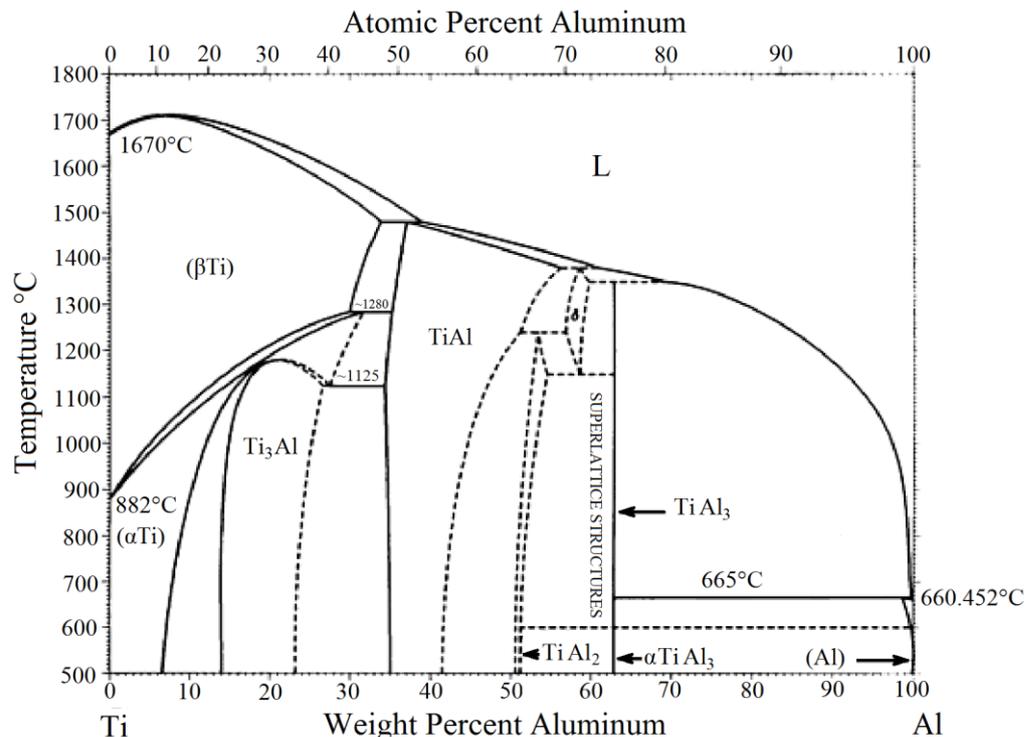


Figure 14 - Ti-Al phase diagram [37]

Titanium aluminide ( $\gamma$ -TiAl) possesses an ordered tetragonal-distorted face - centered structure of the  $Li_0$  type, analogous to CuAu superstructure, in which layers packed with titanium atoms alternate with layers occupied by aluminum atoms. Periods of the  $\gamma$ -phase lattice:  $a = (0,3949 - 0,3984)$  nm;  $c = (0,4065 - 0,4089)$  nm;  $c/a = (1,020 - 1,035)$ . The lattice spacing and the  $c/a$  ratio increases with increasing aluminum content [38].

The homogeneous region of the  $\gamma$  phase is quite large and ranges from 50 to 66% [38]. Depending on the purity and microstructure, the mechanical properties of an intermetallic TiAl range over a wide range and at room temperature are:  $\sigma_v = (350 - 580)$  mPa,  $\delta = (0,5 - 1,5)$  %. The elastic moduli of the TiAl aluminide at 20°C are:  $E = 175$  hPa;  $G = 67$  hPa [39].

SLM of titanium and titanium-based alloys has been very positive in terms of the relative density attained by various researchers. At early stages of research, Santos's group already achieved relative densities of 98% for TiAl [39]. Subsequent research works on titanium and titanium-based materials were able to achieve relative densities of 99,5% or higher.

Titanium parts fabricated by SLM display similar or superior strengths to their cast counter-parts. This is due to the rapid solidification of very small amount of material that results in a more uniform chemical composition and microstructure throughout the component. Besides allowing individualized medical implants to be built with low customization cost, SLM also enabled the fabrication of lightweight titanium scaffold structures for both medical and aeronautical applications. Besides applications in medical implants and light weight structures, SLM of TiAl has been investigated for fabrication of waveguide filters for radio frequency applications [39].

## **2.2 Methods of research**

### **2.2.1 Nanopowders production setup description**

The impulse current generator consists of a high voltage source, a divider and a capacitor bank. A high voltage source allows to charge a capacitor bank from 15 to

35 kV. The level of the charging voltage is measured by means of a voltage divider.

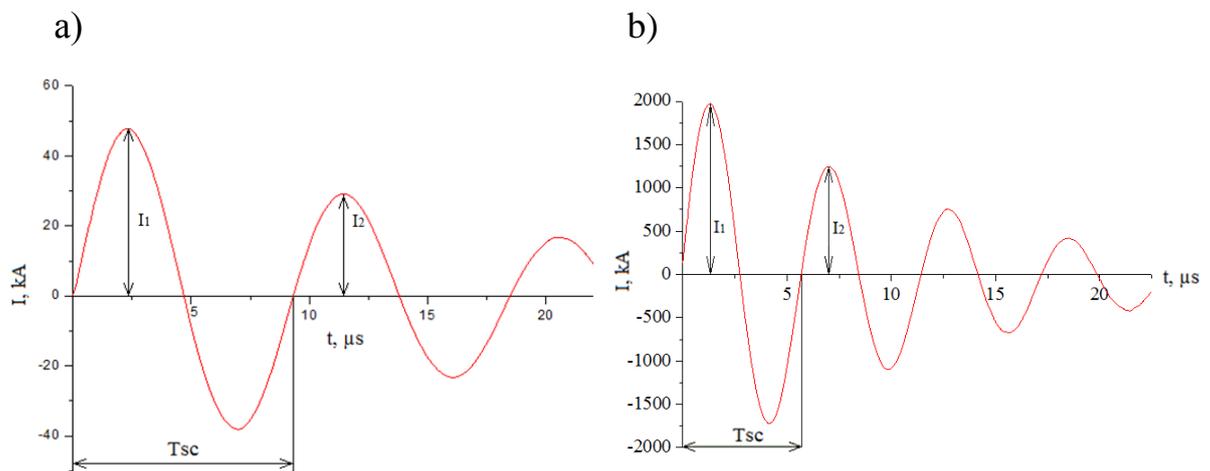
The technological module consists of a high-voltage input, a switch, an explosion chamber, a wire feeder, a working gas inlet system, a variable area flow meter for supplying additional gases, a gas circulation device, and powder collection device (figure 12).

At the end of the experiment, the pressure in the setup is leveled to atmospheric pressure, the bunker with powder is disconnected, and depending on the experimental conditions, powder is subjected to passivation or considered ready.

During the setup operation, oscillograms of the EEW current were recorded using a current shunt and an oscillograph Tektronix TDS2014B. In addition to that, a voltage waveform trace was recorded using a Tektronix P6015 divider.

### 2.2.2 Determination of generator parameters based on short-circuit tests

Parameters of the impulse current generator (active resistance and circuit inductance) can be calculated using oscillograms obtained during short-circuit tests (by the current curve damping ratio) (figure 15).



a) – TiAl wire; b) – 316L wire

Figure 15 – Oscillograms obtained during short circuit test

Short circuit test was carried out with the following values of the circuit characteristics:

- charging voltage of the capacitor bank:  $U_0 = 10 \text{ kB}$  (TiAl wire),  $15 \text{ kB}$  (316L wire);

- total capacitance of capacitor bank:  $C = 2,8 \text{ }\mu\text{F}$  (TiAl),  $1,2 \text{ }\mu\text{F}$  (316L);

The period of oscillation in the circuit depends on the active and reactive resistance:

$$T_{sc} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}, \quad (2)$$

where  $L$  – circuit inductance, H;

$C$  – capacitor bank's capacitance, F;

$R$  – circuit active resistance,  $\Omega$ .

Using oscillogram of the current the amplitudes of the first  $I_1$  and the third  $I_3$  half-waves are determined as well as the period of oscillation. Then the following parameters are calculated:

- Electric current graph damping ratio:

$$\Delta_{\text{TiAl}} = \frac{I_1}{I_3} = \frac{48 \text{ kA}}{29 \text{ kA}} = 1,655, \quad \Delta_{316L} = \frac{I_1}{I_3} = \frac{2006 \text{ kA}}{1244,3 \text{ kA}} = 1,612, \quad (3)$$

where  $I_1$  – amplitude of the first half-wave;

$I_3$  – amplitude of the third half-wave.

- discharging circuit inductance:

$$L_{(\text{TiAl})} = \frac{T_{sc}^2}{C \cdot (4\pi^2 + (\ln\Delta)^2)} = \frac{9,32^2}{2,8 \cdot 10^{-6} \cdot (4\pi^2 + \ln(1,655)^2)} = 0,78 \text{ }\mu\text{H}, \quad (4)$$

$$L_{(316L)} = \frac{T_{sc}^2}{C \cdot (4\pi^2 + (\ln\Delta)^2)} = \frac{5,68^2}{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot (4\pi^2 + \ln(1,612)^2)} = 0,67 \text{ }\mu\text{H},$$

- circuit active resistance:

$$R_{(\text{TiAl})} = \frac{2L \cdot \ln(\Delta)}{T_{sc}} = \frac{2 \cdot 0,78 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(1,655)}{9,32 \cdot 10^{-6}} = 84,32 \text{ m}\Omega, \quad (5)$$

$$R_{(316L)} = \frac{2L \cdot \ln(\Delta)}{T_{sc}} = \frac{2 \cdot 0,67 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(1,612)}{5,68 \cdot 10^{-6}} = 112,64 \text{ m}\Omega,$$

Knowing L and C an important parameter of the generator – impedance  $Z_g$  can be calculated:

$$Z_{g(\text{TiAl})} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,78 \cdot 10^{-6}}{2,8 \cdot 10^{-6}}} = 0,527 \text{ }\Omega, \quad (6)$$

$$Z_{g(316L)} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,67 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 10^{-6}}} = 0,747 \text{ }\Omega.$$

To determine the energy introduced into conductor during an explosion, the Quartzkhava equation has been used [40]:

$$W_{ec} = U_0 \cdot \int_0^{t_e} i(t) dt - \frac{\left( \int_0^{t_e} i(t) dt \right)^2}{2C} - \frac{L_c \cdot i^2(t_{B3})}{2} - R_c \int_0^{t_{B3}} i^2(t_{B3}) dt \quad (7)$$

where  $U_0$  – capacitor bank's charging voltage;

$t_e$  – duration of the current impulse during explosion;

$i$  – flowing current intensity value;

$C$  – capacitor bank capacitance value;

$L_c$  – generator's circuit inductance;

$R_c$  – generator's active resistance.

The processing of the oscillograms was carried out using the Origin software.

### 2.2.3 Transmission electron microscopy (TEM) and scanning electron microscopy (SEM) methods description

The morphology of the particles and their composition were determined by the methods of transmission and scanning electron microscopy (JEOL JEM-2100,

QUANTA 200 3D).

The transmission electron microscope is in many ways similar to an optical transmission microscope, but its design is inverse to the construction of an optical microscope. The electron beam source (with energy of (100 – 400) keV) replaces the light source and is placed on top of the microscope column, while the recording system is at the bottom (figure 16). The electron source is a heated tungsten filament, which creates an electron beam with a current density up to  $5 \cdot 10^4$  A/m<sup>2</sup> [41].

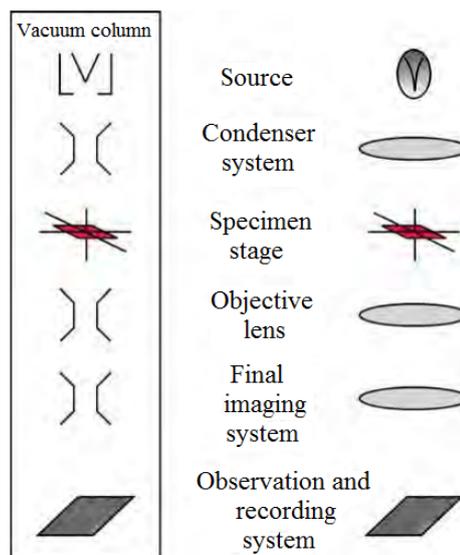


Figure 16 – The transmission electron microscope consists of an electron source, a condenser, a specimen stage, an objective lens, an imaging system, and an image recording system [41]

A beam of high-energy electrons is focused by a system of electromagnetic condenser lenses due to the adjustment of the lens current. Specimen stage is a complex construction that allows to tilt the sample in two planes and move it along the z axis. The imaging system also uses electromagnetic lenses. The image is usually built on a fluorescent screen. To record images, photographic film is usually used, but, like in optical microscopy, it is increasingly being replaced by digital CCD cameras [41].

The scanning electron microscope (figure 17) also has a source of high-energy electrons and a condenser system, but includes an additional electromagnetic control lens that allows scanning an electron beam along the sample surface. The control lens

in a scanning electron microscope performs a function similar to an objective in a transmission electron microscope, and therefore it determines the final resolution of the microscope. However, in a scanning microscope, the control lens is placed above the sample and does not participate in a signal collection process. The signal of elastically scattered electrons plays an insignificant role in the construction of the image in a scanning electron microscope. Image is created by secondary electrons, which appear when the primary electrons interact with the sample. The energy of the primary electrons in the scanning microscope is much lower than in the transmission microscope. Usually it is (5 – 30) keV, although sometimes it is reduced to 200 eV [42].

The image in a scanning electron microscope is obtained by scanning with an electron beam over the sample surface. The signal is collected, amplified and processed, and then demonstrated on the monitor screen. This is similar to the operation principle of a video camera in which a focused image is scanned by an electron beam and a modulated signal is transmitted, recorded and finally displayed on a television screen.

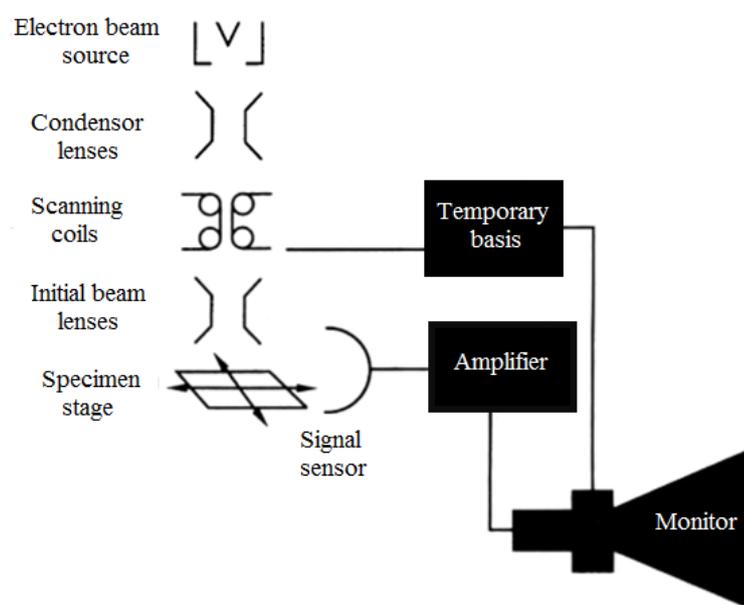


Figure 17 – Scanning electron microscope operation principle [42]

The power of the scanning electron microscope is due to the presence of a wide range of signals that appear when an electron beam interacts with the sample surface.

They include characteristic X-ray radiation, which results from knocking out electrons from the inner atomic shells; cathodoluminescence in the visible light range associated with the valence electrons excitation; the initiated electric current of the sample and the low-loss electrons. Most frequently to build an image the signal of low-energy secondary electrons that are knocked out of the sample by the primary beam is used. Secondary electrons in large quantities are knocked out of the extremely localized region into which the primary electron beam hits. They are easy to assemble and amplify, and then build an image resolution of which is limited only by the primary beam diameter [43].

Characteristic X-ray signal allows to determine complete chemical composition of the sample.

#### **2.2.4 Description of the X-ray diffraction analysis method**

The phase composition of the EEW products was studied using quantitative X-ray diffraction analysis using a Shimadzu XRD-6000 X-ray diffractometer. The X-ray diffractometer consists of a radiation source, beam focusing systems, sample position and orientation adjustment system, detection system and analysis system.

X-rays are generated by directing the electron beam onto a metal target, which is contained in a vacuum tube. A high-energy electron knocks out an electron from the inner shell of the target atom, and an unoccupied state appears. The X-ray quantum is emitted as a result of the transition of an electron from a higher shell to this state. If the entire energy of the primary electron is converted to an X-ray quantum, then its frequency  $n$  is determined by the relation:

$$eV = hn, \quad (8)$$

where  $h$  - Planck's constant, J·s;

$V$  - accelerating voltage, V.

The length of the X-ray wave is inversely proportional to its frequency:

$$\lambda = c/n \quad (9)$$

where  $c$  – speed of light in the medium through which the X-ray propagates, m/s.

$n$  – frequency of the X-ray wave, Hz.

According to the above relations, the minimum length of the X-ray photon is inversely proportional to the magnitude of the accelerating voltage, and [44]:

$$\lambda_{\min} = 1,243/V \quad (10),$$

where  $\lambda_{\min}$  – minimum X-ray wavelength, nm;

$V$ – accelerating voltage, kV.

In reality, X-ray tubes emit a wide spectrum of waves longer than  $\lambda_{\min}$ . The X-ray intensity increases with increasing energy and the primary electron beam intensity, as well as the atomic number of the target (that is, the density of electrons in the target material).

The continuous distribution of energies in the X-rays emitted from the target is called white radiation or Bremsstrahlung (German for «radiation braking» – the slowing down of the electrons by the emission of photons). Superimposed on the continuous spectrum of white radiation, a number of narrow and intense peaks, called characteristic radiation, can be observed (figure 18). The characteristic X-ray photon is emitted when the electron passes to an unfilled inner shell [45].

The X-ray spectrum is usually recorded by rotating an X-ray detector relatively to a sample that is mounted on a goniometer platform. A goniometer allows to rotate the sample about one or more axis (figure 20) [46].

A sample is mounted on a goniometer, which can rotate about one or more axis, and the detector moves around the focusing circle. Various methods of X-rays detecting (including photographic film) are used, the most widely used are proportional counters. In proportional counter a photon ionizes a rarefied gas, an ion cloud is formed and its charge is measured [47].

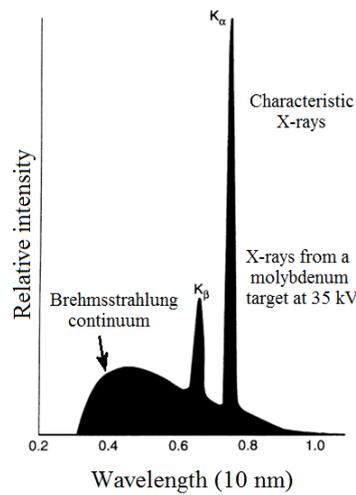


Figure 18 – The interaction of the electron beam with target atoms leads to the emission of continuous white X-ray radiation with a short-wave threshold corresponding to the energy of the primary electrons and a set of narrow characteristic X-ray peaks [45]

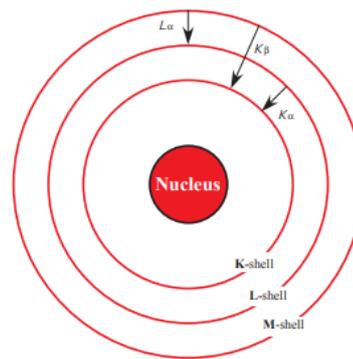


Figure 19 – Characteristic X-radiation is generated by electron transitions involving the inner shells [46]

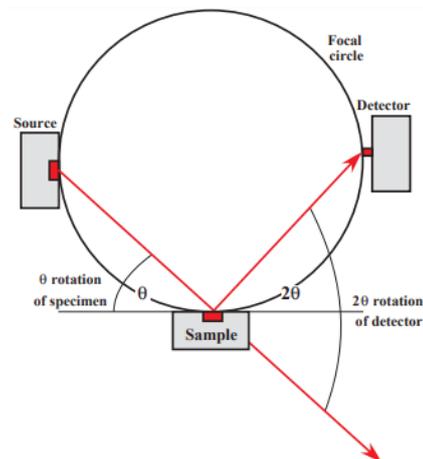


Figure 20 – Schematic representation of the Bragg-Brentano system [47]

## 2.3 Mathematical simulation of particle separation

To solve the particle separation problem, a separator model was developed on the basis of the functioning design of the setup. Simulation of the particle separation process was carried out in the Comsol Multiphysics program. Geometric parameters of a separation unit ((5) in figure 12) are shown in figure 21. Simulation parameters are presented in the next chapter.

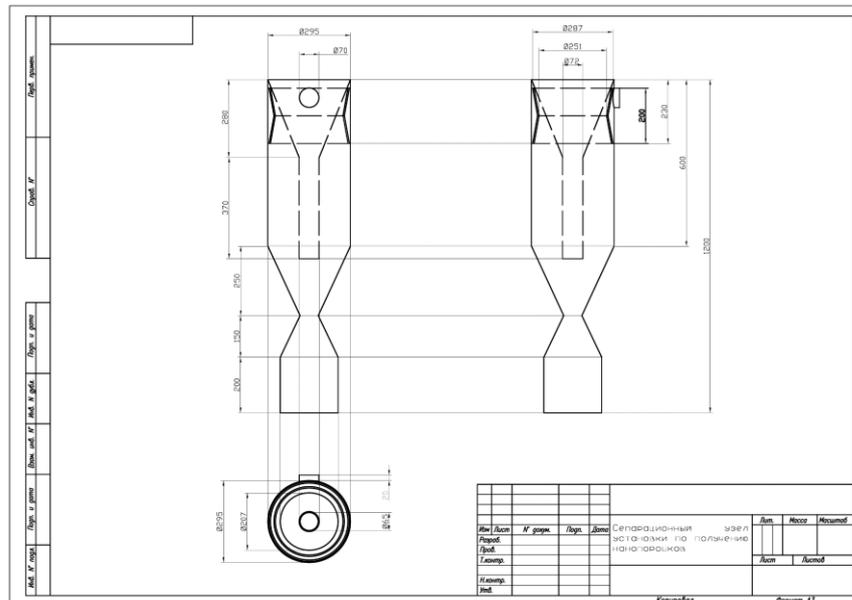
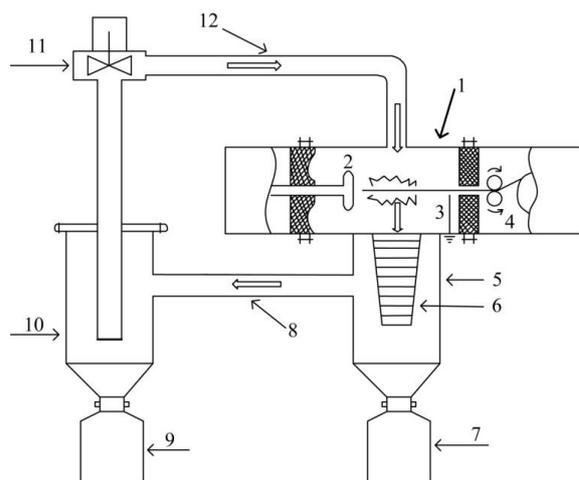


Figure 21 – 2D model of separation unit



1 – explosion chamber; 2 – high-voltage electrode; 3 – grounded electrode; 4 wire feeder; 5,6 – separation unit; 7 – separator powder collector; 10 – cyclone; 9 – cyclone powder collector; 11 – a fan; 8,12 – system of connecting pipelines

Figure 22 – Scheme of the experimental setup

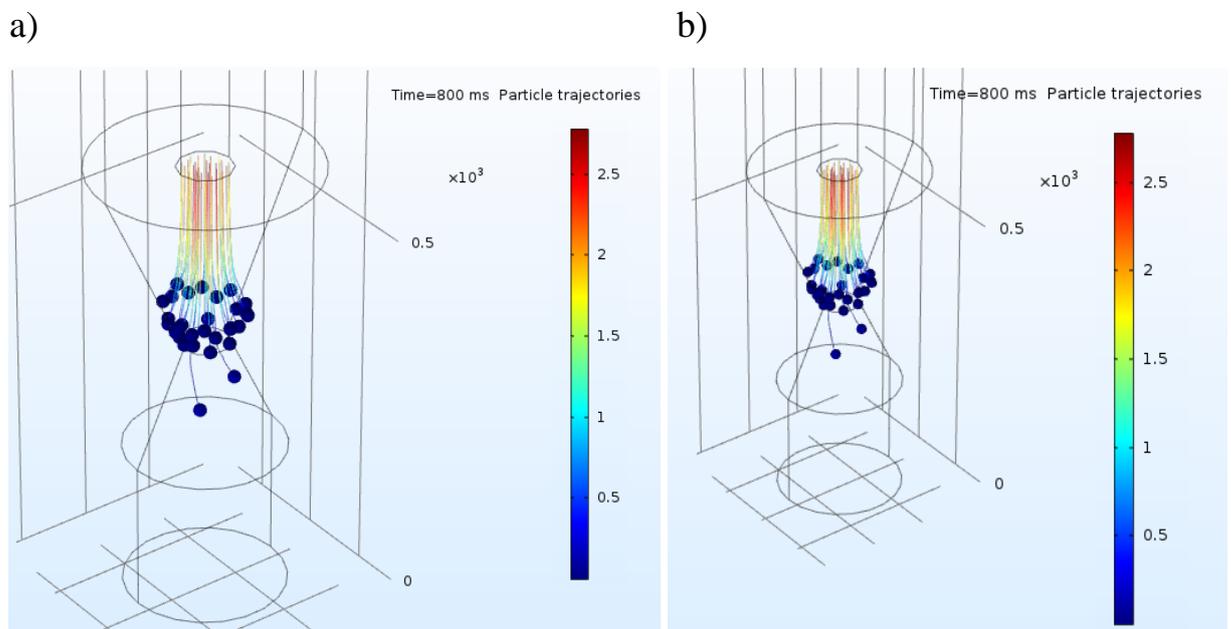
### 3 Determination of electrophysical parameters of the preparation of mixtures of micro- and nanoparticles by means of EEW

#### 3.1 Calculation of the particles trajectories

##### 3.1.1 Calculation of the particles trajectories with dimensions of 100 nm – 10 $\mu\text{m}$

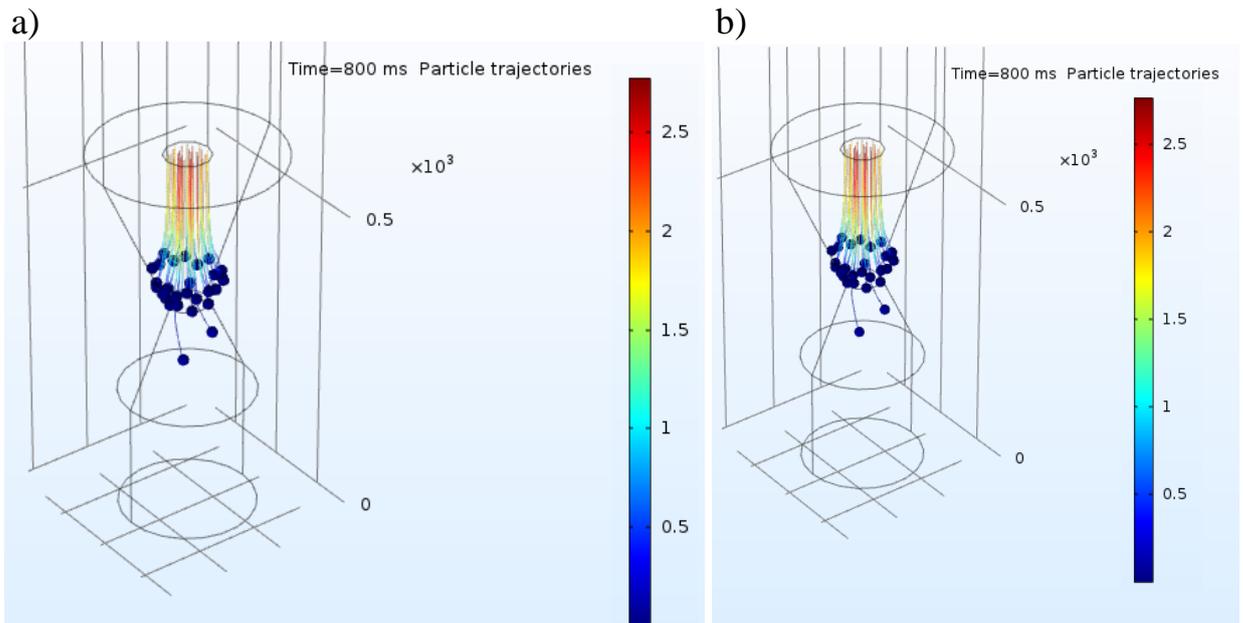
The purpose of the particle trajectory calculating is to determine the influence of such parameters as the flow velocity, gas pressure on the separation of particles from 100 nm to 10  $\mu\text{m}$  in size for a given configuration of the separator. Initial conditions for simulations have the following values: medium – argon (gas) (density –  $5,3517 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , dynamic viscosity –  $2405 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ), temperature is  $313^\circ\text{K}$ , gas pressure - 3 atm, number of particles in the gas stream is 30, particle sizes are varying in the following order: 100 nm, 300 nm, 3  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , density of the particles –  $8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  (316L alloy).

Simulation results are presented in Figures 23 – 26 (v-velocity of the buffer gas in the separator, d-size of the particles being separated).



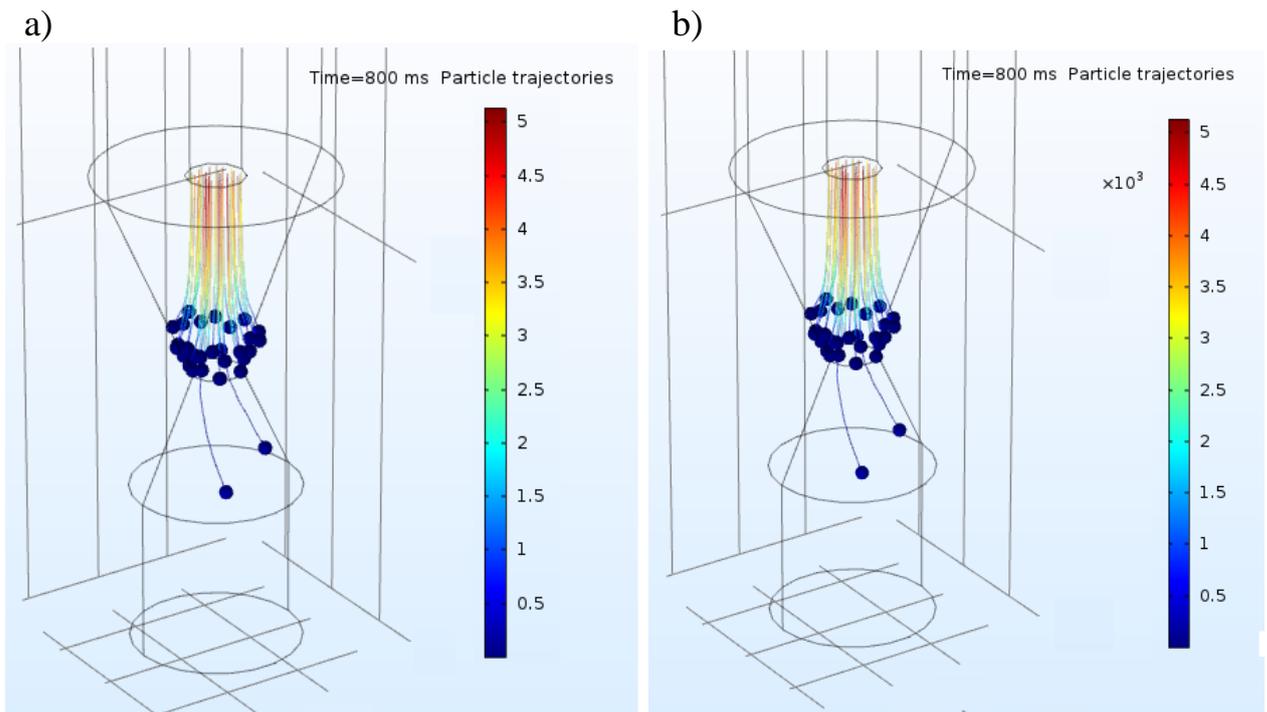
a) –  $v = 2,7 \text{ m/s}$ ,  $d = 100 \text{ nm}$ ; b) –  $v = 2,7 \text{ m/s}$ ,  $d = 600 \text{ nm}$

Figure 23 – Simulation of the motion of particles in a separator



a) –  $v = 2,7 \text{ m/s}$ ,  $d = 3 \text{ }\mu\text{m}$ ; b) –  $v = 2,7 \text{ m/s}$ ,  $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$

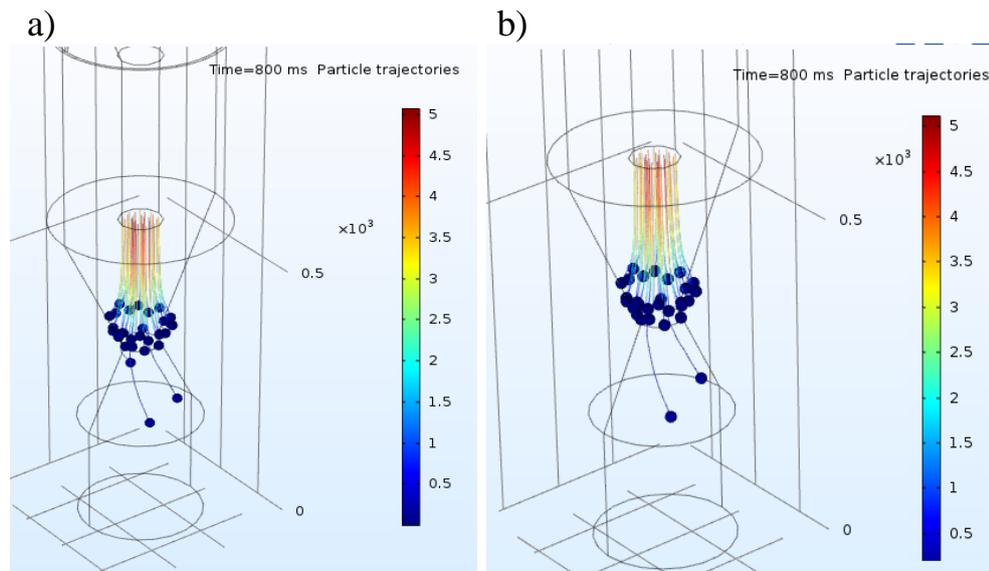
Figure 24 – Simulation of the motion of particles in a separator



a –  $v = 5 \text{ m/s}$ ,  $d = 100 \text{ nm}$

b –  $v = 5 \text{ m/s}$ ,  $d = 600 \text{ nm}$

Figure 25 – Simulation of the motion of particles in a separator



a)  $v = 5 \text{ m/s}$ ,  $d = 3 \mu\text{m}$

b)  $v = 5 \text{ m/s}$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$

Figure 26 – Simulation of the motion of particles in a separator

The results of the sample analysis (figure 27) confirm the mathematical simulation data, indicating that under specified modeling conditions, particles from 100 nm to 10  $\mu\text{m}$  in size do not settle in the separator. Instead, particles settling on the walls of the converging part of the separator, continue to move in the buffer gas flow, and then finally settle in the cyclone, which indicates the inefficiency of the separator operation. Particles with a wide distribution in size settle in the cyclone.

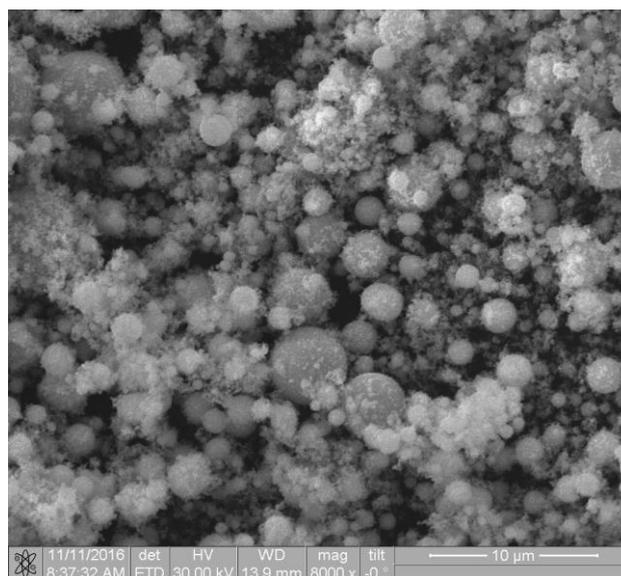


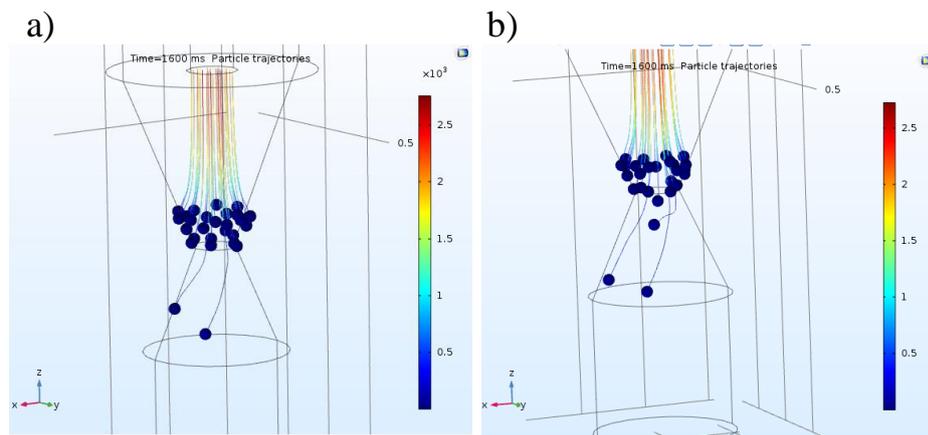
Figure 27 – Particles microphotographs, sample from the cyclone

### 3.1.2 Calculation of the particles trajectories with dimensions of 10 $\mu\text{m}$ – 100 $\mu\text{m}$

At this stage of the simulation, the following task has to be accomplished:

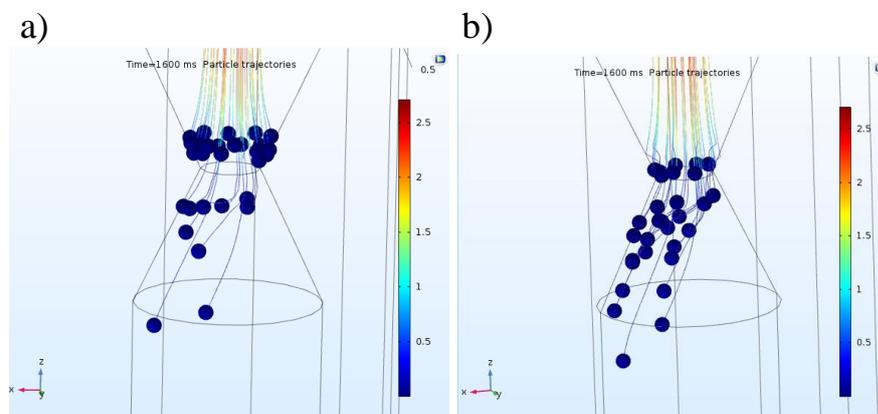
- to determine, using COMSOL Multiphysics modeling package, the efficiency of the existing separating unit (how separation goes for different particle sizes and buffer gas pressures).

To accomplish a task, simulations of the particles motion in the separator with changes in the corresponding parameters were carried out. The particle size varied from 10 to 100 microns in 10 micron steps. The pressure values in the separator were taken as follows: 0,1 atm, 0,5 atm, 1 atm, 2 atm, 3 atm. The results are shown in figures 28 – 32 (P – pressure in the setup).



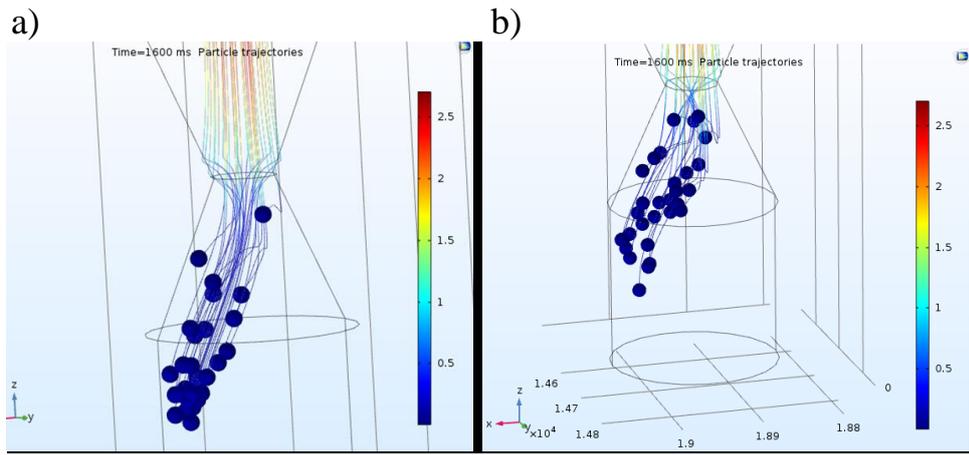
a – P = 0,5 atm., d = 10  $\mu\text{m}$ ; b – P = 0,5 atm., d = 20  $\mu\text{m}$

Figure 28 – Simulation of the motion of particles in a separator



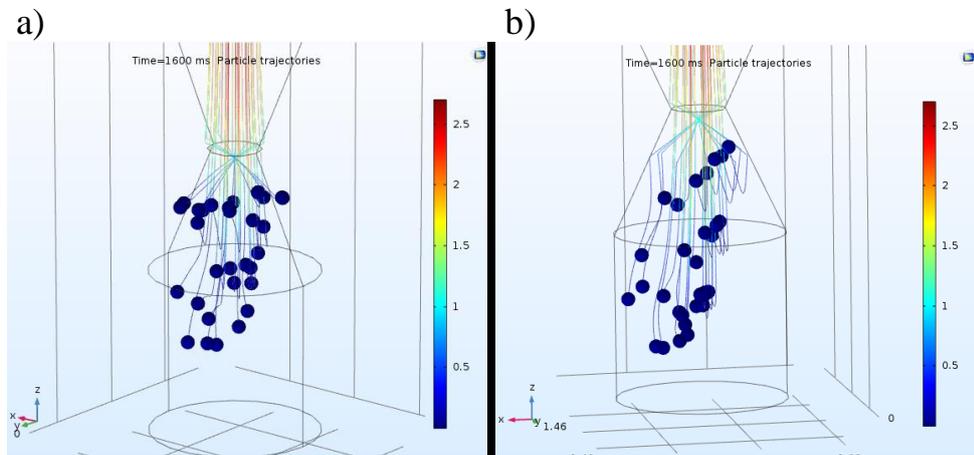
a – P = 0,5 atm., d = 30  $\mu\text{m}$ ; b – P = 0,5 atm., d = 40  $\mu\text{m}$

Figure 29 – Simulation of the motion of particles in a separator



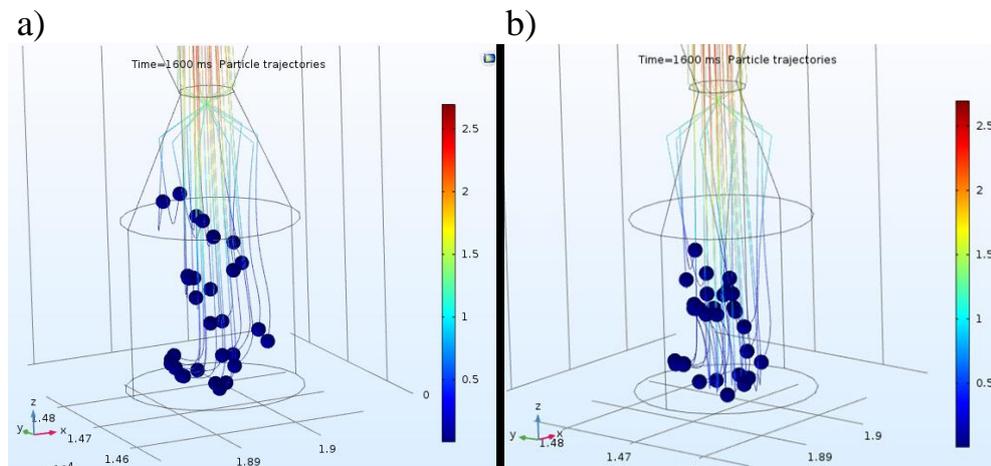
a –  $P = 0,5 \text{ atm.}$ ,  $d = 50 \mu\text{m}$ ; b –  $P = 0,5 \text{ atm.}$ ,  $d = 60 \mu\text{m}$

Figure 30 – Simulation of the motion of particles in a separator



a –  $P = 0,5 \text{ atm.}$ ,  $d = 70 \mu\text{m}$ ; b –  $P = 0,5 \text{ atm.}$ ,  $d = 80 \mu\text{m}$

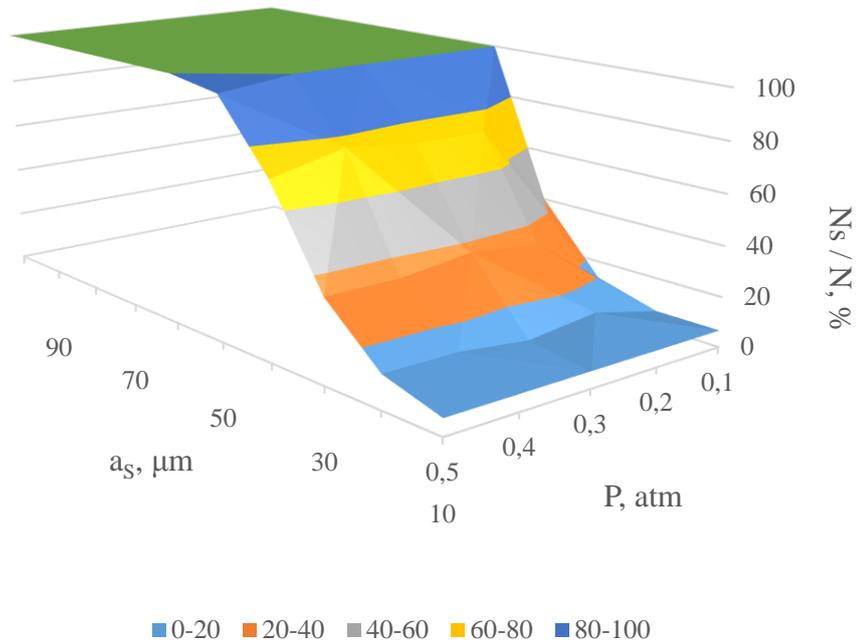
Figure 31 – Simulation of the motion of particles in a separator



a –  $P = 0,5 \text{ atm.}$ ,  $d = 90 \mu\text{m}$ ; b –  $P = 0,5 \text{ atm.}$ ,  $d = 100 \mu\text{m}$

Figure 32 – Simulation of the motion of particles in a separator

Accordingly, for the same particle sizes, trajectories are calculated at pressures of 0,1 atm, 1 atm, 2 atm and 3 atm. Results are shown in the graph (figure 33). The graph shows the dependence of the particles number settled in the separator on the particle size at a certain value of the pressure in the separator.



$a_s$  – particles size;  $P$  – pressure in the separator,  $N_s / N$  – settled particles to total number of particles ratio

Figure 33 – Amount of particles settled in the separator at different values of pressure and particle size

Simulation operations were also performed using other inert gases: helium and nitrogen (figures 34 and 35).

Conclusion on the simulation results: patterns of the ratio of particles settled in the separator and the total number of particles launched into the separator in all experiments are similar. Existing separator unit is most effective in separating particles from 50 microns or higher while, for additive technologies, as mentioned earlier, it is necessary to obtain particles ranging in size from hundreds of nanometers to tens of microns. Results indicate the ineffectiveness of the existing unit.

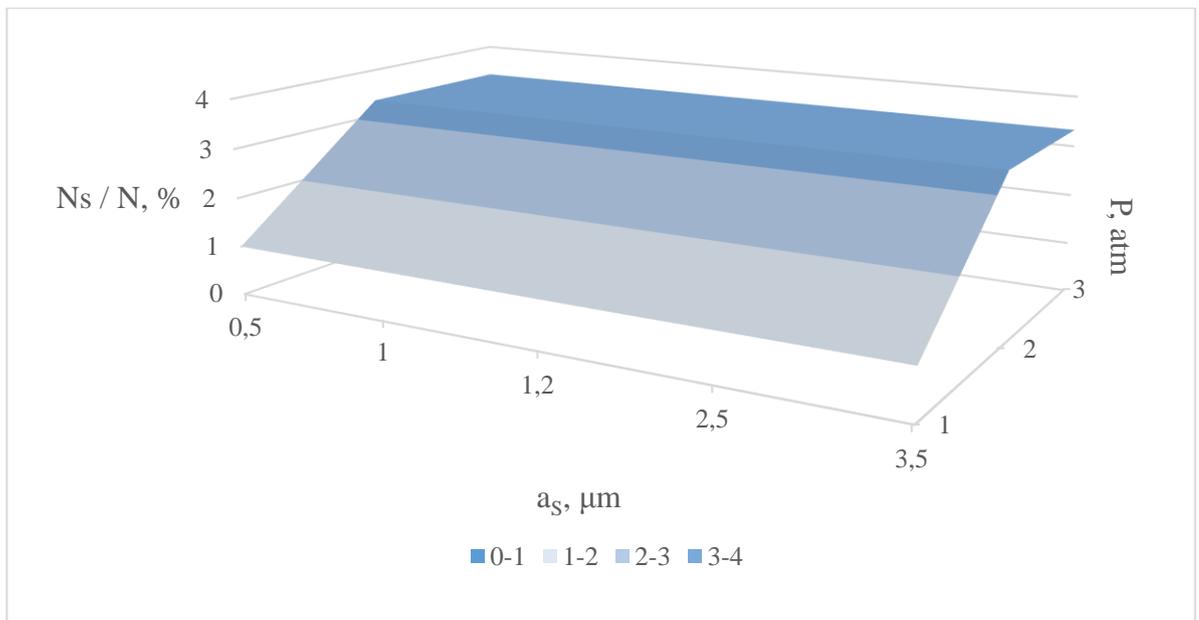


Figure 34 – Results of particle separation simulation in helium medium

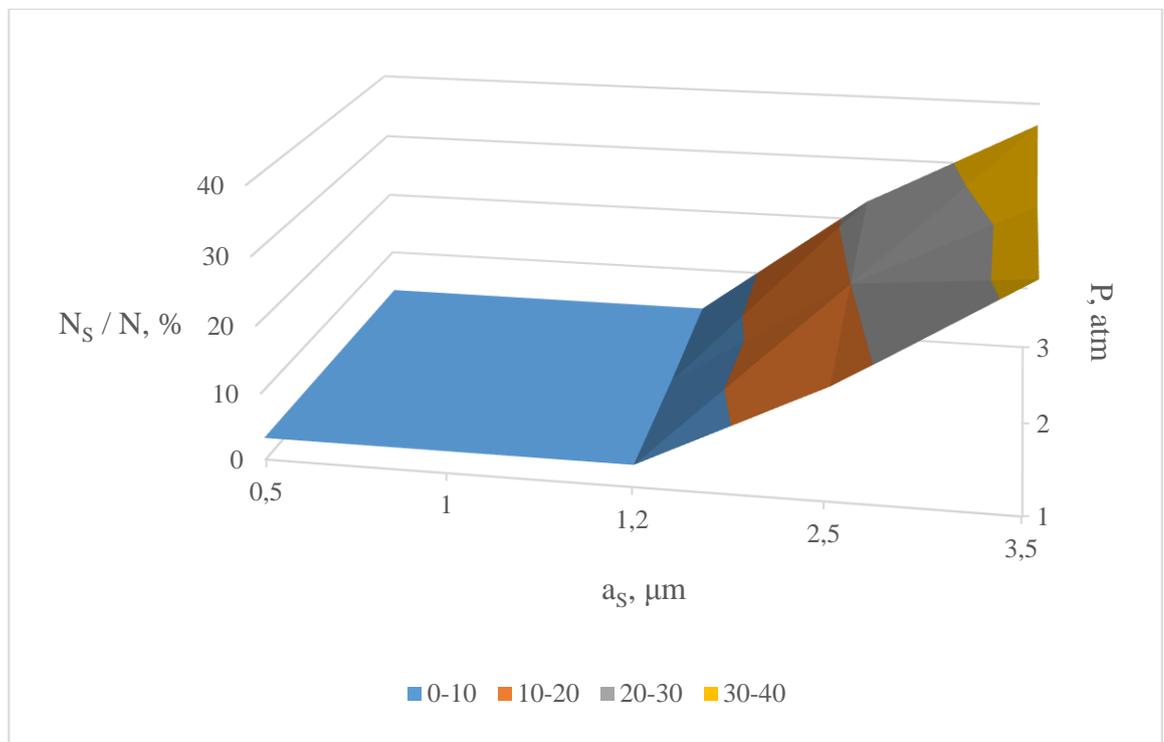


Figure 35 – Results of particle separation simulation in nitrogen medium

### 3.2 Parameters of electric explosion of 316L alloy wire and joint electric explosion of two interlaced Ti and Al wires

Parameters of EEW of a 316L alloy and the joint electric explosion of two interlaced Ti and Al wires are presented in table 1:  $E_s$  – sublimation energy of wires,

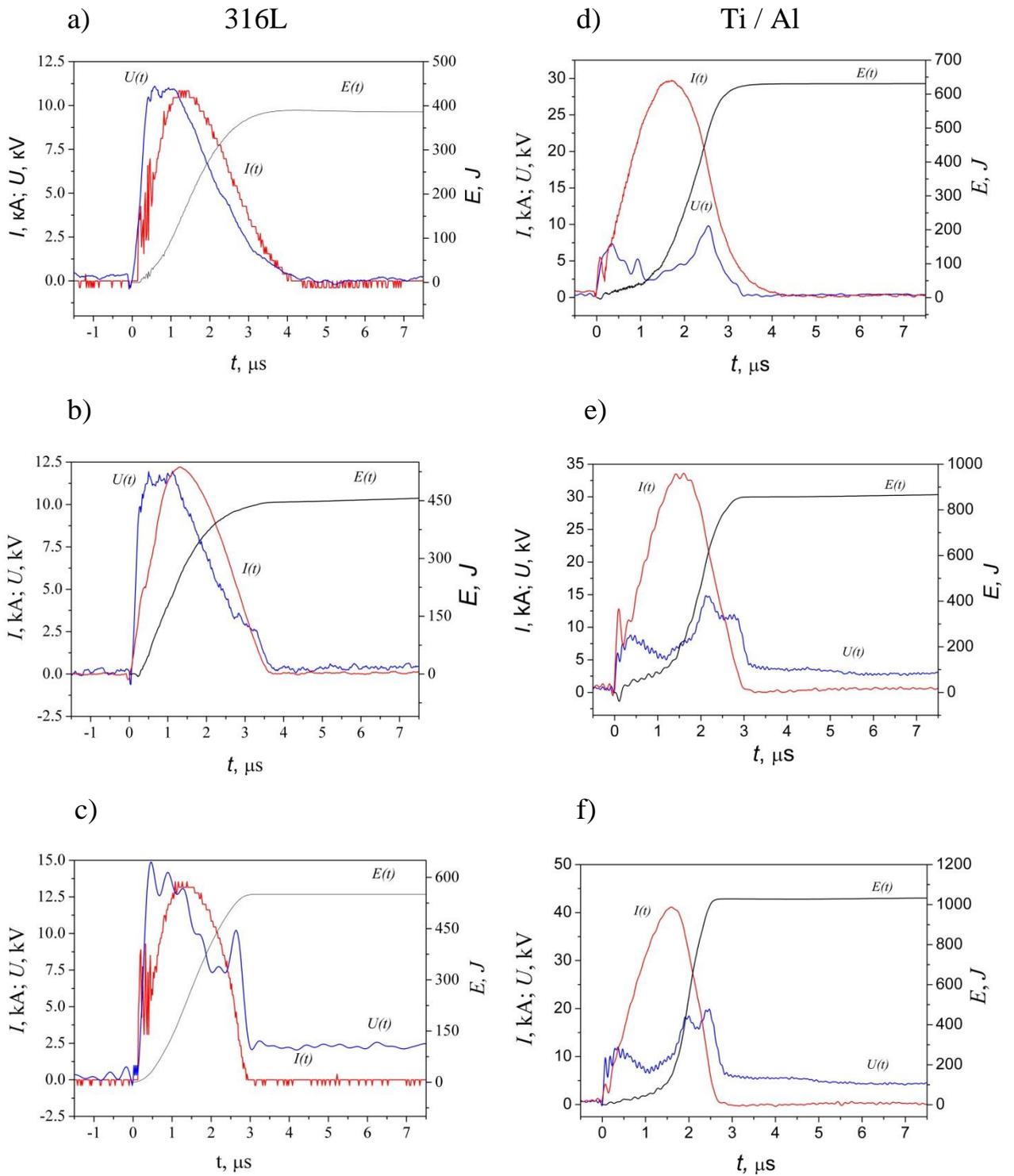
$U_0$  – charging voltage of the capacitive energy storage device,  $C$  – capacity of the energy storage device,  $d$  – is diameter of the wires,  $l$  – wire length,  $f$  – frequency of the explosion with continuous wire feeding into explosion chamber.

Table 1 – EEW parameters

Sample	EEW parameters					
	$E_c$ , J	$U_0$ , kV	$C$ , $\mu\text{F}$	$d$ , mm	$l$ , mm	$f$ , Hz
316L	490	27	1,2	0,35	95	0,3
		30				
		33				
Ti/Al	330 (Ti) 290(Al)	24	2,8	Ti – 0,32 Al – 0,35	100	0,3
		27				
		30				

Figure 36 shows dependences of current and voltage on time, typical for electric explosion of 316L and Ti/Al alloy wires in argon medium, as well as the time dependence of the introduced energy  $E(t)$ . Data in figure 36 (a, b, c) represents that an increase in  $U_0$  from 27 to 33 kV leads to an increase in the energy introduced into the wire from  $0,77$  to  $1,1E_c$ . An analysis of the data presented in figure 36, c shows that at  $E > 1,1E_c$ , formation of an arc discharge stage by the explosion products is likely. Additional heating of the explosion products in the arc discharge stage is undesirable, since it leads to agglomeration of the particles, which makes it difficult to separate them in size. An increase in  $U_0$  from 27 to 33 kV increases the density of the flowing current ( $j$ ) from  $1,14 \cdot 10^7$  to  $1,4 \cdot 10^7$  A /  $\text{cm}^2$ .

It follows from the data presented for the  $j$  values that a further decrease in the input energy will lead to a decrease in the flowing current density down to  $10^7$  A /  $\text{cm}^2$  and less. At  $j < 10^7$  A /  $\text{cm}^2$  the mode of the explosion changes from fast to slow, in which explosion products scatter in the form of droplets with dimensions comparable to the wire diameter, which makes it impossible to obtain samples based on a mixture of micro- and nanoparticles.



a) –  $U_0 = 27$  kV; b) –  $U_0 = 30$  kV; c) –  $U_0 = 33$  kV; d) –  $U_0 = 24$  kV; e) –  $U_0 = 27$  kV; f) –  $U_0 = 30$  kV

Figure 36 – Dependences of current, voltage and input energy typical for electric explosion of 316L alloy wires (a,b,c) and interlaced Ti/Al wires (d,e,f)

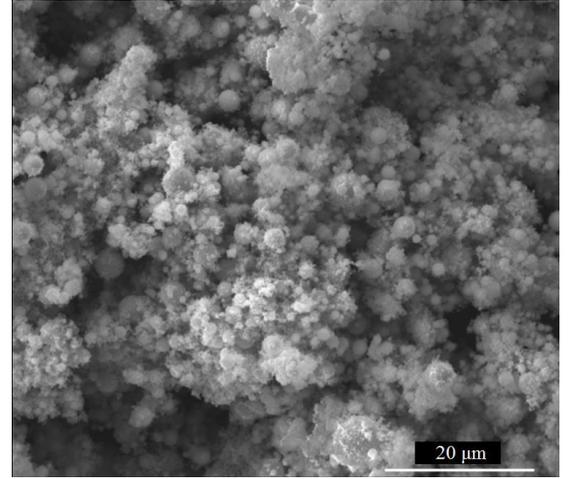
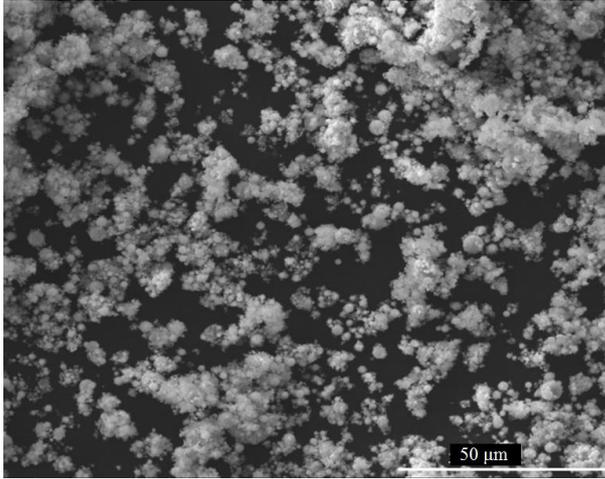
Figure 36 (d, e, f) show the time dependences of the current, voltage, and also the energy introduced into the Ti/Al wires in the electric-explosive synthesis of Ti-Al particles samples.

It follows from the data presented in figures that increase in  $U_0$  from 24 up to 30 kV leads to an increase in the energy introduced into the wire from  $E_c$  to  $1,7 E_c$  (where  $E_c = E_c (\text{Al}) + E_c (\text{Ti})$ ). Analysis of the data presented in figure 36 (e) reveals that at  $1,7E_c$  there are two overvoltage peaks ( $t \approx 2,0 \mu\text{s}$ ,  $t \approx 2,5 \mu\text{s}$ ), which indicates an unsynchronous explosion of wires. A decrease in  $U_0$  from 30 to 24 kV leads to the disappearance of one of the two overvoltage peaks. Since diameters of the wires are about the same, and the lengths have the same value, it can be concluded that the first explosion is an explosion of an aluminum wire, which has a lower fusion heat. At  $U_0 = 27$  kV, explosion of a titanium is most likely to be low-energy, as indicated by the absence of a characteristic overvoltage peak (by analogy with the data in figures 36 a, 37 b). Thus, further reduction of the energy introduced into the wire ( $U_0 < 27$  kV) is unpractical.

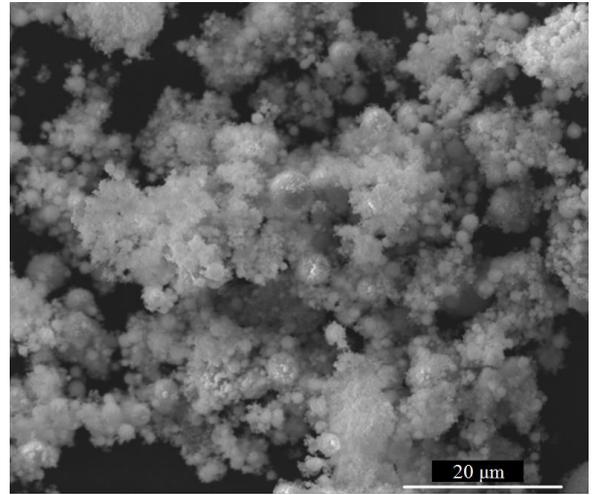
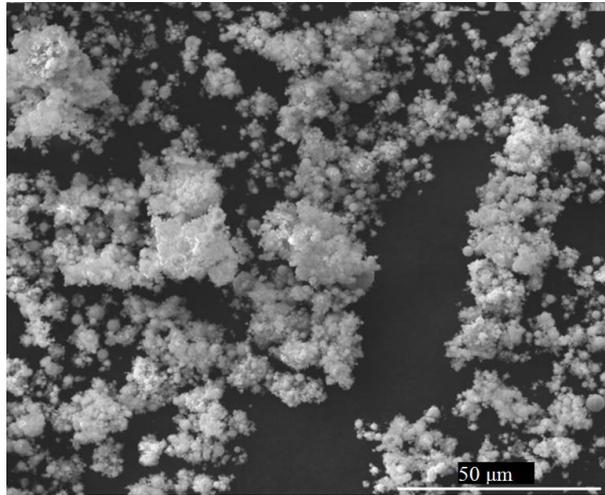
### **3.3 Producing and studying the structural-phase state of samples of mixtures of micro- and nanoparticles of 316L and Ti-Al alloys**

Samples were obtained using a setup, a schematic image of which is shown in figure 22. Figure 37 shows micrographs of particles of 316L alloy. Analysis of the data presented in figure 37 revealed that in the samples obtained at  $U_0 = 27$  kV and  $U_0 = 30$  kV, there are no particles with dimensions larger than  $10 \mu\text{m}$  (figures 37 a, b). The sample obtained at  $U_0 = 33$  kV is represented by agglomerates of particles of submicron sizes containing individual particles of micron sizes (figure 37 c). Review of the literature has shown that for the 316L alloy, the optimal mass content of the nanosized fraction in the samples of micro- and nanoparticles, which makes it possible to obtain a density of about 97 % of the theoretical density, is about 25 % [10].

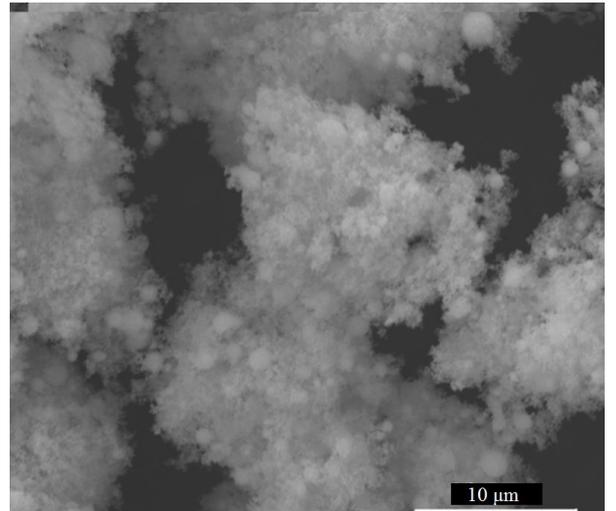
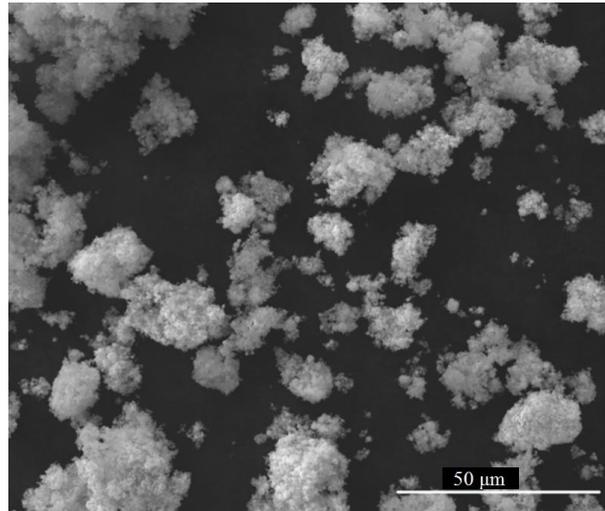
a)



b)



c)



a)  $E/E_c \approx 0,77$ ; b)  $E/E_c \approx 0,91$ ; c)  $E/E_c \approx 1,1$

Figure 37 - Microphotographs of mixtures of micro- and nanoparticles of 316L alloy

Figure 38 represents dependence of the average particle size of the 316L alloy on the energy input in the wire ( $E/E_c$ ). The average particle size was obtained from the analysis of specific surface of samples. Analysis of the data presented in figure 38 reveals that the average particle size ( $a_s$ ) decreases with increasing  $E/E_c$  ratio. Such behavior of the dependence coheres with the literature data describing the dependence  $a_s$  on  $E/E_c$ .

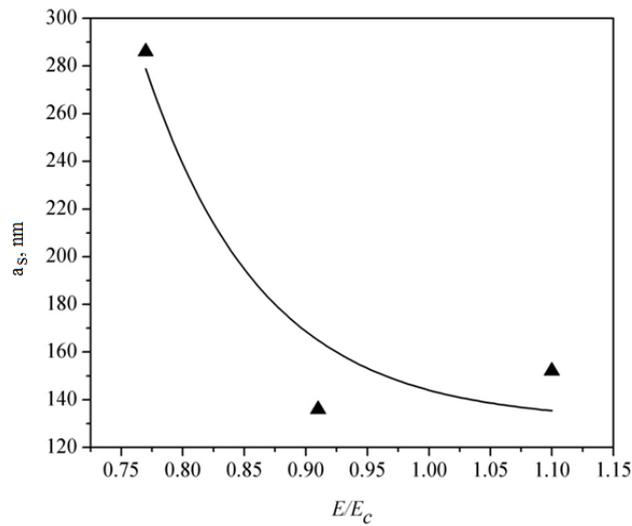


Figure 38 - Dependence of the average particle size  $a_s$  on  $E/E_c$  for 316L alloy

Figure 39 represents the size distribution functions for micron fraction particles. As shown, increase in input energy leads to reducing of average particle size of the micron fraction.

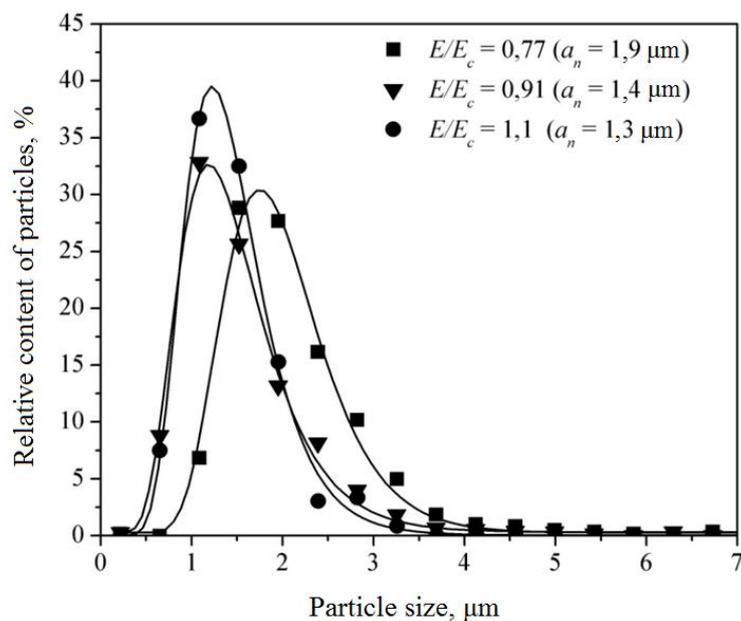


Figure 39 - Particle size distribution of the micron fraction of 316L alloy

Figure 40 shows the X-ray diffraction analysis (XRD) of samples of 316L alloy particles. It follows from the presented data that the phase composition of the samples is represented by  $\alpha$ - and  $\gamma$ -Fe. With the increase in the energy introduced into the wire, the phase composition of the particle samples does not change. The predominant content of  $\alpha$ -Fe in particle samples shows that under the experimental conditions, it is not possible to stabilize the austenite structure of particles, which is characteristic structure of the 316L alloy in the bulk state.

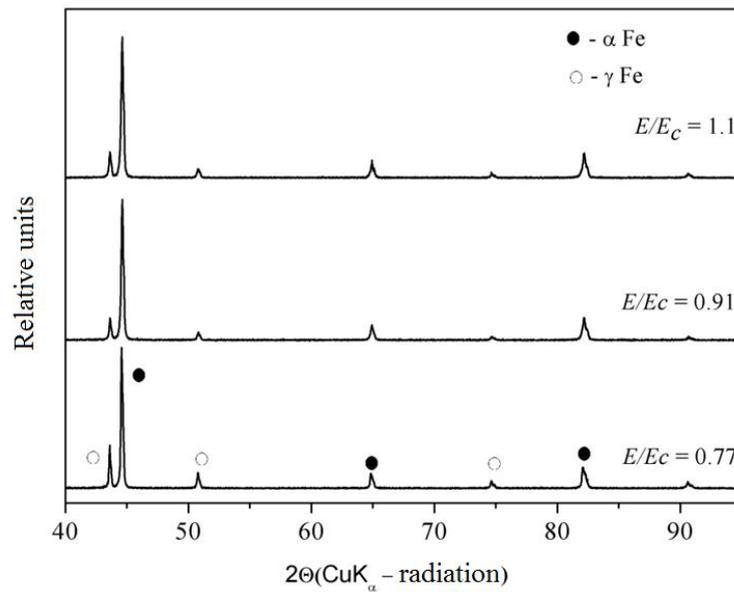


Figure 40 – XRD data on 316L alloy samples

Stabilization of  $\alpha$ -Fe particles in samples can be a consequence of low cooling rates of the dispersed phase leading to decay of the austenite structure. According to a state diagram shown in figure 13, austenite structure is formed when content of Ni by weight is more than 9 %. Reduction of Ni content to 5 % by weight leads to stabilization of the two-phase state ( $\alpha + \gamma$ ) of the alloy in the entire temperature range. Since there is no Ni phase in samples according to X-ray diffraction data, it is possible to eliminate the probability of formation of a two-phase state ( $\alpha + \gamma$ ) as a result of the depletion of individual particles by Ni atoms compared to the wire composition. For this reason, it can be concluded that austenite structure formation in products produced by consolidation of powders based on synthesized 316L alloy particles can be achieved

by homogenizing annealing of the product in the temperature range of (1050 – 1100) °C, followed by quenching.

Resulting data shows that under experimental conditions, obtained samples based on homogeneous mixture of micro- and nanoparticles.

Figure 41 presents the  $a_s - (E/E_c)$  dependence for Ti-Al particles. Analysis of the data revealed that as the  $E/E_c$  ratio increases, the average particle size decreases.

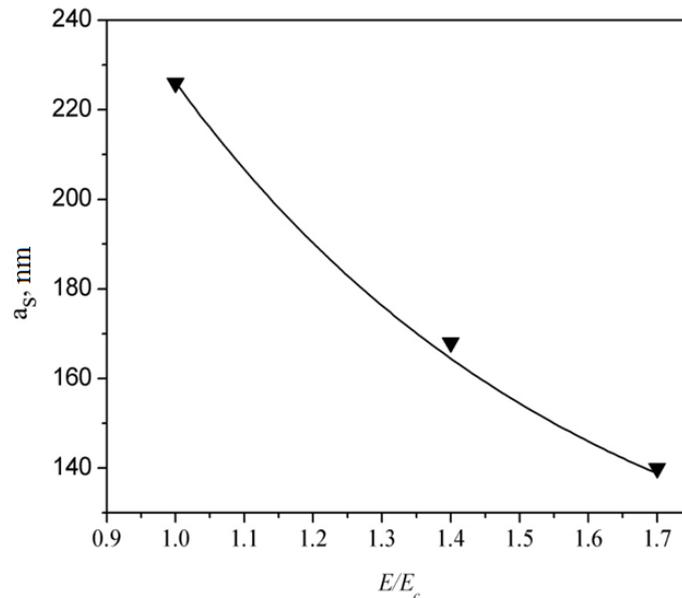
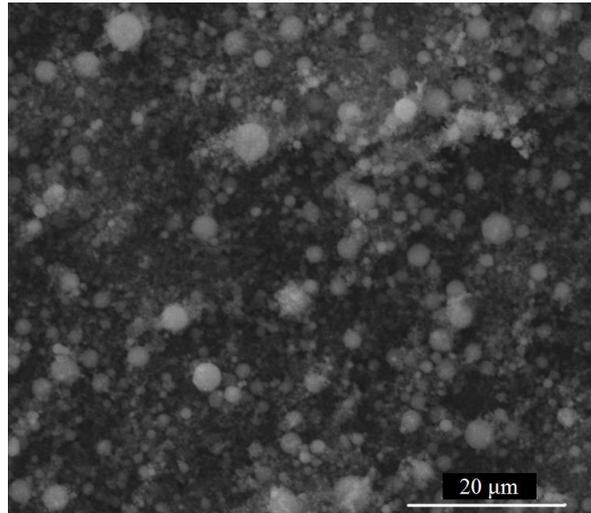


Figure 41 - Dependence of the average particle size ( $a_s$ ) on  $E/E_c$  ratio for Ti-Al particles

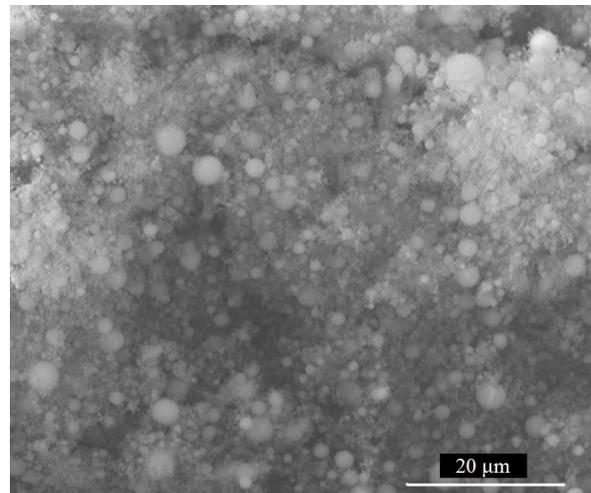
Figure 42 shows microphotographs of Ti-Al particles. Data presented in figures 60 (a), 60 (b), indicates that samples are represented by a mixture of micro- and nanoparticles. At  $E/E_c \approx 1,7$ , samples are represented by agglomerates of nanoparticles containing individual particles of micron sizes (figure 42, c). With increasing input energy value, content of micron fraction particles in the samples decreases. Particles with a size greater than 10  $\mu\text{m}$  were not detected in the samples which were shown at the microphotographs.

Figure 43 shows the size distribution functions for micron fraction particles.

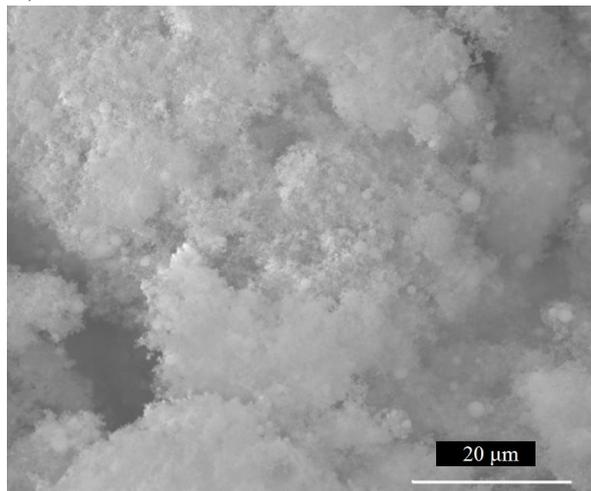
a)



b)



c)



a) –  $E/E_c \approx 1,0$ ; b) –  $E/E_c \approx 1,4$ ; c) –  $E/E_c \approx 1,7$

Figure 42 - Microphotographs of mixtures of micro- and nanoparticles of Ti-Al

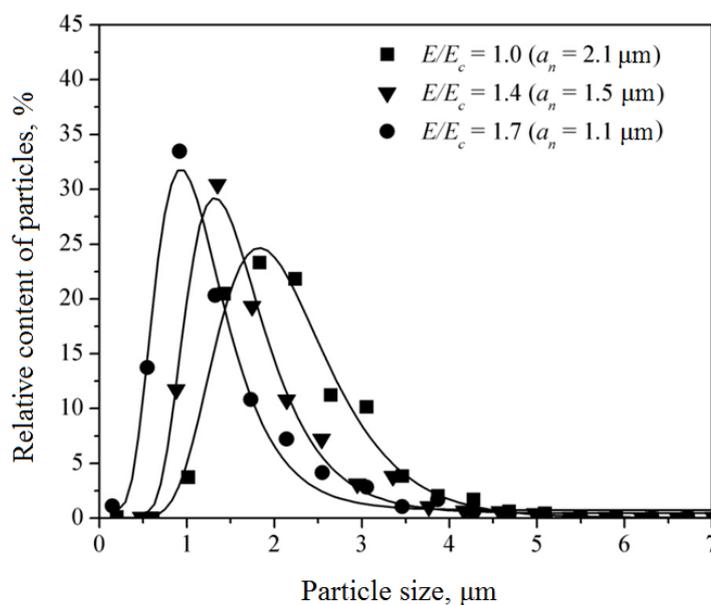
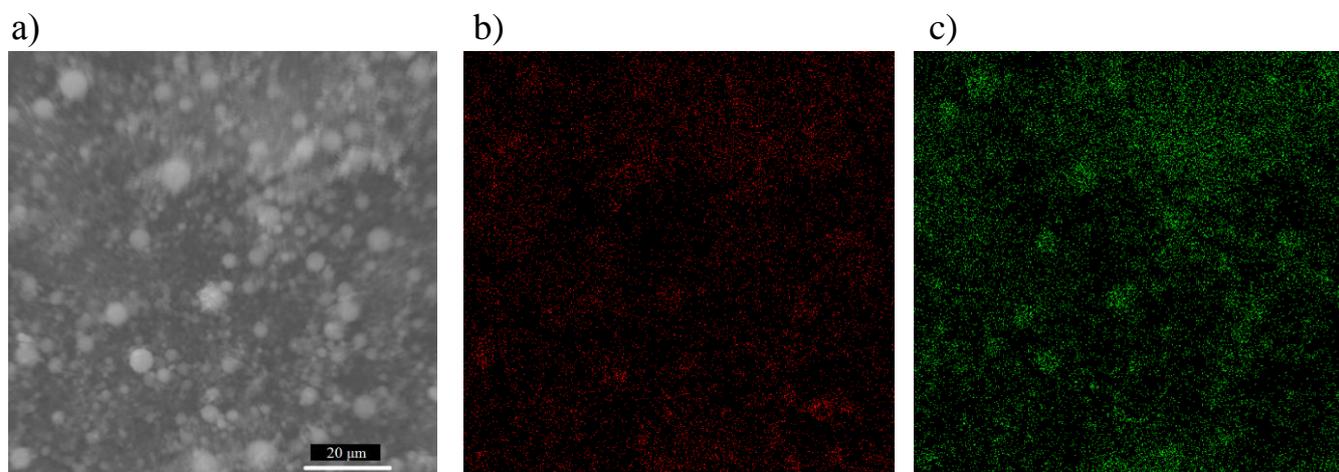


Figure 43 – Particle size distribution of the Ti-Al micron fraction

Figure 44 presents distribution maps of the elements (Al - figure 44,b; Ti - figure 45, c) in a sample obtained at  $E/E_C = 1$ . Presented data indicates a homogeneous distribution of Ti and Al in the sample.



a) – microphotograph; b) – aluminum distribution map; c) – titanium distribution map

Figure 44 - Distribution maps of aluminum and titanium in a sample obtained at  $E/E_C \approx 1$

Figure 45 presents the results of XRD of Ti-Al particles samples. It was established that a phase composition of samples is represented by intermetallides  $\gamma$  - TiAl,  $\alpha_2$  -  $Ti_3Al$  and solid  $\alpha$  - Ti solution. With increasing  $E/E_C$  ratio, the phase composition of samples does not change.

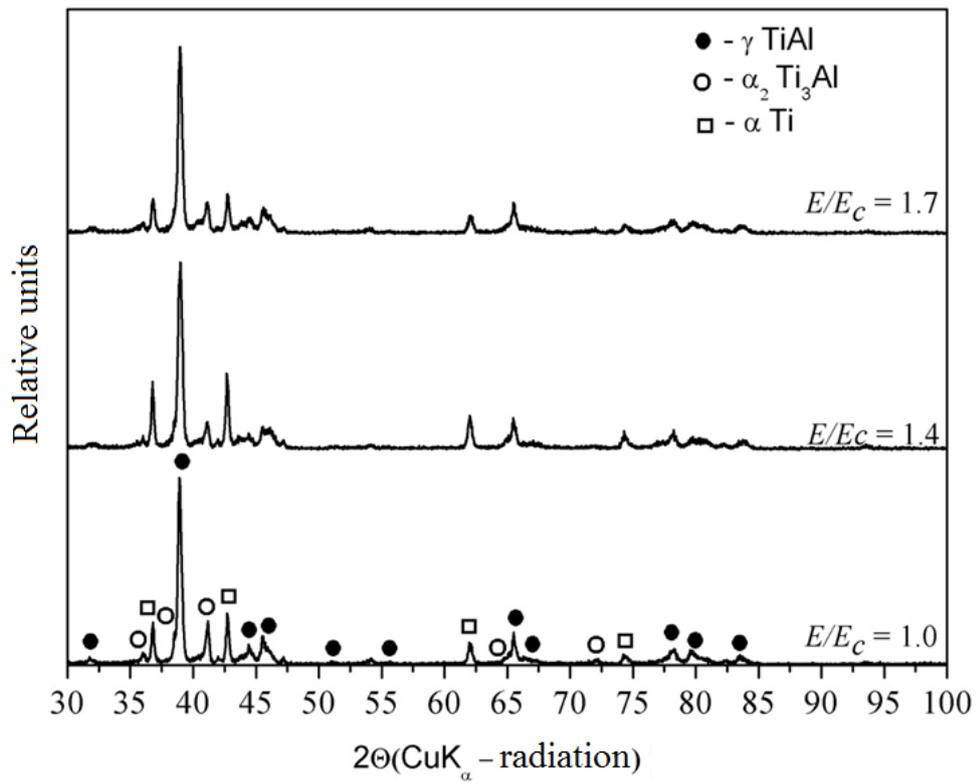


Figure 45 – XRD data of Ti-Al particles samples

Obtained data indicates the possibility of obtaining a homogeneous mixture of micro- and nanoparticles of Ti-Al under the conditions of the conducted experiments.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«РЕСУРСООЭФФЕКТИВНОСТЬ И ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4ТМ61	Самарканову Фархату Жанатовичу

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	Отделение материаловедения
<b>Уровень образования</b>	Магистр техники и технологии	<b>Направление/специальность</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

**Исходные данные к разделу «Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент»:**

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Потенциальные потребители результатов НИИ</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизации установки 10% Норма амортизации ПК 33,3</i>
<i>3. Использование систем налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные страховые фонды, которые составляют 30 %.</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	<i>SWOT-анализ НИИ, разработка иерархической структуры проекта</i>
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Проект выполняется в рамках магистерской диссертации, устав не требуется.</i>
<i>3. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Разработка календарного плана и бюджета научного исследования.</i>
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Определение целесообразности и эффективности НИИ: оценка рисков и научно-технического уровня исследования, оценка ресурсоэффективности проекта</i>

**Перечень графического материала:**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Карта сегментирования рынка</li> <li>2. Матрица SWOT -анализа проекта</li> <li>3. Иерархическая структура работ</li> <li>4. Диаграмма Ганта</li> <li>5. Смета затрат на научно-исследовательскую работу</li> </ol>
--

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Старикова Екатерина Васильевна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Самарканов Фархат Жанатович		

## **4 Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент**

Темой магистерской выпускной квалификационной работы является исследование электрического взрыва проводника как метода получения нанопорошков с целью определения параметров электрического взрыва проволок для получения однородных смесей микро и наночастиц сплавов 316L и TiAl.

Целью раздела «Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент» является оценка эффективности и возможности проведения данного исследования, оценки рисков и затрат, а также решение задач [48].

Поставим задачи для данного раздела:

- Оценить перспективность исследования;
- Составить план выполнения исследования;
- Рассчитать необходимые затраты для исследования.

### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Перспективность исследований определяется не столько важностью и глобальностью открытия, которые тяжело оценить на начальных этапах проекта, а именно коммерческой оценкой. Оценка коммерческой ценности – обязательно условие, необходимое для поиска источников финансирования и, следовательно, для успешного проведения научного исследования [48].

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что недостаточная оценка рынков сбыта производимой продукции является одной из главных причин несостоятельности многих проектов. Необходим глубокий анализ спроса на продукцию, которую предполагается выпускать, определить, в каких объемах и по какой цене его купят. Определив спрос, устанавливают максимальный объем производства, который предприниматель сможет осуществить с учетом своих потенциальных возможностей.

Потенциальными потребителями данного научно технического исследования являются промышленные заводы, которые выпускают различные электрические аппараты, компании, занимающиеся стереолитографией металлами.

Таблица 2 – Карта сегментирования рынка

		Отрасли, занимающиеся нанопорошками			
		Научные институты	Внедренческие организации	Заводы-изготовители	Компании, занимающиеся 3D печатью металлами
Сфера деятельности по нанопорошкам	Производство нанопорошков	х		х	
	Освоение новых методов получения нанопорошков	х	х		
	Изучение свойств нанопорошков	х		х	х
	Анализ характеристик нанопорошков	х	х		х
	Продажа нанопорошков	х	х	х	
	Продажа результатов исследований и анализов нанопорошков	х			
	Использование нанопорошков в промышленных целях			х	х

Как видно из карты сегментирования, основным сегментом данного рынка являются научные институты, которые выполняют почти весь цикл работ, связанных с нанопорошками. Целью исследований, выполняемых в рамках ВКР, является изучение свойств и анализ нанопорошков и дальнейшая продажа результатов исследований организациям и компаниям, занимающихся применением нанопорошков.

Иерархическая структура работ – инструмент, позволяющий разбить проект на составные части. Она устанавливает иерархически структурированное распределение работ по реализации проекта, описывает все работы, которые должны быть выполнены в проекте.

Содержание работ данного проекта определено и структурировано в виде иерархии, которая приведена на рисунке 46.



Рисунок 46 - Иерархическая структура работ

Приведенная на рисунке 46 структура работ - важнейший элемент успеха проекта, потому что фокусирует внимание на результате проекта. Благодаря декомпозиции, исполнители проекта получили полное и одновременно ясное представление ожидаемого результата всего проекта.

Для того чтобы оценить факторы и явления, способствующие или препятствующие продвижению проекта, был произведен SWOT – анализ проекта. Описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта приведены в таблице 3.

Следующий этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 3 – Матрица SWOT

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
С1. Уникальность исследования С2. Возможность участвовать в конференциях С3. Наличие опытного научного руководителя С4. Актуальность проводимого исследования С5. Обширная сфера применения С6. Исследование проводится на базе НИ ТПУ	В1. Возможность создания партнерских отношений с рядом исследовательских институтов В2. Большая стоимость конкурентных разработок и сложность их использования В3. Возможность выхода на внешний рынок
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
Сл1. Требуется уникального оборудования Сл2. Малое количество потенциальных потребителей продукции Сл3. Информационные материалы могут быть использованы конкурентами Сл4. Требуется тщательного сбора исходных данных Сл5. Многостадийность методики	У1. Развитие конкуренции в сфере анализа исследований нанопорошков У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования У3. Сложность выхода на рынок, в связи с длительной процедурой апробации технологии получения нанопорошков

При анализе сильных сторон проекта можно выявить следующие коррелирующие сильные стороны и возможности: В1С1С2С3С4С5С6, В2С1С2С4С5, В3С1С4С5, также можно выявить следующие корреляции сильных сторон и угроз: У1С1С5. При анализе слабых сторон можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможности: В1Сл1Сл4, В2Сл1Сл2 Сл3 Сл4 Сл5, также можно выявить следующие корреляции слабых сторон и угроз: У1Сл3, У2Сл1, У3Сл1Сл2Сл3.

Таким образом, самой большой угрозой для проекта является развитие конкуренции в сфере анализа исследований нанопорошков, что на данном этапе не прогнозируется, поскольку данная методика имеет теоретическую, математическую и экспериментально обоснованную базу, которая является наиболее удобной и целесообразной в использовании.

Также среди угроз можно отметить сложность выхода на рынок в связи с длительной процедурой апробации технологии получения нанопорошков. Исследование имеет потенциал, небольшой круг потенциальных потребителей и возможность выхода на внешний рынок.

Таблица 4 - SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Уникальность исследования</li> <li>2 Возможность участвовать в конференциях</li> <li>3 Наличие опытного научного руководителя</li> <li>4 Актуальность проводимого исследования</li> <li>5 Обширная сфера применения</li> </ol> <p>Исследование проводится на базе НИ ТПУ</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Требуется уникального оборудования</li> <li>2 Малое количество потенциальных потребителей продукции</li> <li>3 Информационные материалы могут быть использованы конкурентами</li> <li>4 Требуется тщательного сбора исходных данных</li> </ol>
<p><b>Возможности:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Возможность создания партнерских отношений с рядом исследовательских институтов</li> <li>2 Большая стоимость конкурентных разработок и сложность их использования</li> <li>3 Возможность выхода на внешний рынок</li> <li>4 Рост потребности в обеспечении безопасности технологического процесса и сокращения экономических издержек</li> </ol>	<p>Актуальность разработки и опытный руководитель дает возможность сотрудничать с рядом ведущих исследовательских институтов;</p> <p>Рост потребности в обеспечении безопасности технологического процесса и сокращения экономических издержек возможен за счет принципиально новой методики;</p> <p>За счет новизны и принципиальных отличий возможен выход на большие объемы применения данной методики исследования.</p>	<p>Возможность наличия партнерских отношений с исследовательскими институтами для взаимного использования уникального оборудования.</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Развитие конкуренции в сфере анализа исследований нанопорошков</li> <li>2 Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования</li> <li>3 Сложность выхода на рынок, в связи с длительной процедурой апробации технологии получения нанопорошков.</li> </ol>	<p>Универсальность применения методов исследований и обширная сфера применения программного комплекса минимизируют влияния развитой конкуренции в обозначенной сфере;</p> <p>Актуальность проводимого исследования и наличие опытного научного руководителя в сочетании с принципиально новой методикой проведения работ обеспечивают стремительный выход на внутренний рынок.</p>	

Планирование этапов и выполнения работ проводимого научного исследования выполняется поэтапно:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научного исследования собирается группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном пункте составлен перечень работ в рамках проведения научного исследования и распределены исполнители по видам работ. Порядок приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание исследовательской части работ	Содержание технической части работ	Должность исполнителя
Структурирование исследования	1	Составление и утверждение технического задания	Обзор литературы, сбор необходимых данных, технических параметров оборудования, изучения технологического процесса.	Руководитель
	2	Планирование эксперимента	Подготовка установки ЭВП.	Инженер
	3	Календарное планирование работ по теме	Составление графика выполнения работ на всех этапах.	Инженер
Проведение метода ЭВП	4	Оценка качества выполнения ЭВП	Наработка нанопорошков с помощью установки ЭВП.	Инженер
	5	Определение объема исследования	Пассивирование нанопорошков.	Инженер
Сбор данных	6	Рентгенофазовый анализ	Получение дифрактограмм с помощью дифрактометра.	Инженер
	7	Расчет энергии, введенной в проводник	Снятие осциллограммы тока.	Инженер
	8	Термический анализ	Получение данных с помощью термоанализатора.	Инженер
Анализ НП	9	Сравнение полученных результатов	Анализ данных.	Инженер
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Составление отчета о проделанной работе, с указанием проблематики проводимого исследования, результатов.	Инженер
	11	Архивация полученных выводов	Написание выводов о проделанной работе.	Руководитель, инженер

Линейный график проекта представлен в виде календарного плана.

Таблица 6 – Календарный план

№ работ	Вид работ	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение технического задания	21	8.09.17	28.09.17	Руководитель
2	Планирование эксперимента	28	29.09.17	25.10.17	Инженер
3	Календарное планирование работ по теме	7	26.10.17	1.11.17	Инженер
4	Оценка качества выполнения ЭВП	5	2.11.17	6.11.17	Инженер
5	Определение объема исследования	2	7.11.17	8.11.17	Инженер
6	Рентгенофазовый анализ	30	9.11.17	8.12.17	Инженер
7	Расчет энергии, введенной в проводник	30	15.01.18	13.02.18	Инженер
8	Термический анализ	30	14.02.18	14.03.18	Инженер
9	Сравнение полученных результатов	60	15.03.18	14.05.18	Инженер
10	Составление пояснительной записки	7	15.05.18	21.05.18	Инженер
11	Архивация полученных выводов	7	22.05.18	28.05.18	Руководитель, инженер
	Итого		227		

Таблица 7 - Диаграмма Ганта

№ работ	Вид работ	Исполнители	Дни	Продолжительность выполнения работ											
				Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май			
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	21	■											
2	Планирование эксперимента	Инженер	28		■										
3	Календарное планирование работ по теме	Инженер	7			■									
4	Оценка качества выполнения ЭВП	Инженер	5			■									
5	Определение объема исследования	Инженер	2			■									
6	Рентгенофазовый анализ	Инженер	30			■	■	■							
7	Расчет энергии, введенной в проводник	Инженер	30						■	■					
8	Термический анализ	Инженер	30							■	■				
9	Сравнение полученных результатов	Инженер	60								■	■	■		
10	Составление пояснительной записки	Инженер	7											■	
11	Архивация полученных выводов	Руководитель, инженер	7											■	

■ - научный руководитель

■ - инженер

Таким образом, общее число работ составило 11. Ожидаемая трудоемкость работ для научного руководителя составила 28 человеко-дней, для студента-исполнителя составила 206 чел-дней. Общая максимальная длительность выполнения работы составила 227 календарных дней.

#### **4.2 Расчет бюджета для научно-технического исследования**

В процессе формирования бюджета НТИ используется группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных исследований;
- основная заработная плата;
- дополнительная заработная плата;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

Так же для оценки расходов, затраченных на проведение данного научно-технического исследования, составим смету расходов и амортизацию используемой техники.

Рассчитываем смету расходов, включающую затраты на приобретение необходимого оборудования для разработки проекта и текущие расходы. Затраты, образующие себестоимость продукции (работ, услуг), группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

Амортизация — это процесс периодического переноса начальной стоимости основного средства или нематериального актива на производственные, коммерческие или общехозяйственные расходы — в зависимости от того, как этот актив используется.

Таблица 8 - Амортизация

Наименование	Стоимость, руб	Срок службы, лет	Время использовани я, дней	Амортизация, руб
ПК	45000	3	140	5753
Термоанализатор	300000	10	24	1972
Осциллограф	80000	5	24	1052
Установка ЭВП	3000000	5	3	4931
Дифрактометр	20000000	20	24	65753
Итого				79461

В данном пункте рассчитывается основная заработная плата руководителя и инженера. Заработная плата определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок ТПУ. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы.

Пункт включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (11)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (12)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Тарифные ставки были приняты на основании регламентирующих документов планово-финансового отдела ТПУ [49].

Таблица 9 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	104
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	24
- невыходы по болезни	10	10
Действительный годовой фонд рабочего времени	242	214
Рабочие дни	28	206

Таблица 10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З <sub>гс</sub> , руб.	З <sub>дн</sub> , руб.	Т <sub>р</sub> , раб.дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Научный руководитель	31434	1350	23	31050
Инженер	14584	763	140	106820
Итого				137870

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (13)$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Также рассчитываются обязательные отчисления органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (14)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2017 году водится пониженная ставка – 30 %.

Отчисления во внебюджетные фонды представлено в таблице 11.

Таблица 11 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Итого
Научный руководитель	31050	4658	35708
Инженер	106820	16023	122843
<b>Итого</b>	<b>137870</b>	<b>20681</b>	<b>158551</b>
<b>Отчисления, руб (30 %)</b>			
Научный руководитель	10712		47565
Инженер	36853		

Накладные расходы – то все прочие затраты, не вошедшие в предыдущие пункты (ксерокопии, электроэнергия, отопление, услуги связи и др.). Вычисляются по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (Z_{\text{аморт}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (15)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%, тогда размер накладных расходов составит 38082 рублей.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведено в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Итого	%
1. Амортизация	79461	24,5
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	137870	42,6
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	20681	6,4
4. Отчисления во внебюджетные фонды	47565	14,7
5. Накладные расходы	38082	11,8
<b>Бюджет затрат НТИ</b>	<b>323659</b>	

Таким образом, затраты на амортизацию составили 79461 рублей, основная заработная плата 137870 рублей, дополнительная заработная плата 20681 рублей, отчисления во внебюджетные фонды 47565 рублей, накладные расходы 38082. Суммарный бюджет затрат научного исследования составил – 323659 рублей. Учитывая перспективность исследования и бюджет НИ ТПУ, было бы целесообразно провести данное научное исследование, т.к. затраты сравнительно небольшие для исследования такого уровня, если предположить что такие исследования будут проводиться каждый год.

#### 4.3 Оценка рисков научно – технического исследования

При оценке рисков НТИ оценивается вероятность их наступления ( $P_i$ ). По шкале от 0 до 100 процентов: 100 – наступит точно, 75 – скорее всего наступит, 50 – ситуация неопределенности, 25 – риск скорее всего не наступит, 0 – риск не наступит. Оценка важности риска оценивается весовым коэффициентом ( $w_i$ ). Важность оценивается по 10- балльной шкале  $b_i$ . Сумма весовых коэффициентов должна равняться единице. Оценка важности рисков приведена в таблице 13.

Таблица 13 – Экономические риски

№	Риски	$P_i$	$b_i$	$w_i$	$P_i * w_i$
1	Инфляция	100	1	0,019	1,960
2	Экономический кризис	25	2	0,039	0,980
3	Недобросовестность поставщиков	25	6	0,117	2,941
4	Непредвиденные расходы в плане работ	50	7	0,137	6,862
5	Снижение уровня спроса на продукцию	50	10	0,196	9,803
6	Сложность выхода на мировой рынок	75	7	0,137	10,294
7	Колебания рыночной конъюнктуры	25	6	0,117	2,941
8	Отсутствие в числе сотрудников экономистов	25	2	0,039	0,980
9	Низкие объемы сбыта	50	10	0,196	9,803
	Сумма		51	1	46,568

Таблица 14 – Технологические риски

№	Риски	$P_i$	$b_i$	$w_i$	$P_i * w_i$
1	Возможность поломки оборудования	25	7	0,25	6,25
2	Низкое качество поставленного оборудования	25	9	0,3214	8,0357
3	Неправильная сборка оборудования	25	8	0,2857	7,1428
4	Опасность для работающего персонала и аппаратуры	75	4	0,1428	10,714
	Сумма		28	1	32,142

Таблица 15 – Научно-технические риски

№	Риски	$P_i$	$b_i$	$w_i$	$P_i \cdot w_i$
1	Развитие конкурентных технологий	75	7	0,145	10,937
2	Создание новых методов синтеза	75	7	0,145	10,937
3	Риск невозможности усовершенствования технологии	50	8	0,166	8,333
4	Отсутствие результата в установленные сроки	50	7	0,145	7,2916
5	Получение отрицательного результата при внедрении в производство	25	10	0,208	5,208
6	Несвоевременное патентование	25	9	0,187	4,687
	Сумма		48	1	47,395

Далее производится расчет общих рисков:

Таблица 16 – Общая оценка риска проекта

Виды рисков в группе	$P_i$	$b_i$	$W_i$	$P_i \cdot W_i$
Экономические	46,57	10	0,25	11,64
Технологические	32,14	9	0,5	16,07
Научно-технические	47,4	6	0,25	11,85
Итого		25	1	39,56

Итоговая оценка составила около 40%, что является весьма неплохим показателем для научного исследования.

#### 4.4 Анализ и оценка научно-технического уровня исследования

Необходимо рассчитать коэффициент научно-технического уровня. Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок, в котором каждому из признаков НТУ присваивается определенное число баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по формуле:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i \cdot P_i \quad (16)$$

где  $k_i$  – весовой коэффициент  $i$  – го признака;

$P_i$  – количественная оценка  $i$  – го признака.

Таблица 17 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0.4
Теоретический уровень	0.2
Возможность и масштабы реализации	0.4

Таблица 18 – Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
<u>8-10</u>	<u>Сравнительно высокий НТУ</u>
11-14	Высокий НТУ

Таблица 19 – Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Установка законов, разработка новой теории	10
<u>Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами</u>	<u>8</u>
Разработка алгоритма	6
Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)	0.5

Таблица 20 - Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
<u>В течение первых лет</u>	<u>10</u>
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
<u>Отрасль</u>	<u>4</u>
Народное хозяйство	10

$$k_1 = 0.4, P_1 = 10, k_2 = 0.2, P_2 = 8,$$

$$k_3 = 0.2, P_3 = 10, k_4 = 0.2, P_4 = 4.$$

$$НТУ = 0.4 \cdot 10 + 0.2 \cdot 8 + 0.2 \cdot 10 + 0.2 \cdot 4 = 8.4$$

По полученным результатам расчета коэффициента научно-технического уровня можно сделать вывод, что данный проект имеет высокую значимость теоретического и практического уровня, и при этом используется в широком спектре отраслей.

Таким образом, анализируя результаты оценки, можно заключить, что проводимое исследование имеет высокую значимость теоретического и практического уровня, а также приемлемый уровень рисков. Это подтверждает целесообразность проводимого научного исследования.

#### 4.5 Оценка ресурсоэффективности проекта

Ресурсоэффективность производства нанопорошков методом ЭВП определяется при помощи интегрального критерия ресурсоэффективности, который имеет следующий вид:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (17)$$

где:  $I_{pi}$  - интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  - весовой коэффициент проекта;

$b_i$  - бальная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 21.

Таблица 21 - Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
1. Качество нанопорошков	0,25	4
2. Рентабельность	0,25	5
3. Производительность	0,20	5
4. Экономичность	0,20	4
5. Экологичность	0,10	5
Итого:	1,00	

Интегральный показатель ресурсоэффективности для разрабатываемого проекта:

$$I_{pi} = 0,25 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 + 0,20 \cdot 4 + 0,10 \cdot 5 = 4,55$$

Проведенная оценка ресурсоэффективности проекта дает достаточно неплохой результат (4,55 из 5), что свидетельствует об эффективности реализации технического проекта.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проекта имеет важное значение при выполнении раздела «Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент». Его высокое значение говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы безопасности и надежности, удобства в эксплуатации и предполагаемый срок эксплуатации позволяют судить о корректно выполненной разработке системы.

### **Заключение**

В ходе выполнения раздела «Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент» были решены следующие задачи:

1. Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, результат которого показал большой потенциал проводимого исследования, а также возможность быстрого выхода на внешний рынок обеспечены принципиально новым подходом к решению поставленной задачи.

2. Определен полный перечень работ, проводимых при исследовании нанопорошков. Общее число работ составило 11. Определена трудоемкость проведения работ. Ожидаемая трудоемкость работ для научного руководителя составила 28 чел-дней, для студента-исполнителя составила 206 чел-дней. Общая максимальная длительность выполнения работы составила 227 календарных дней.

3. Суммарный бюджет затрат НИИ составил – 323659 рублей. Расчет бюджета осуществлялся на основе следующих пунктов:

- расчет материальных затрат НИИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4. Определена целесообразность и эффективность научного исследования путем анализа и оценки научно-технического уровня проекта, а также оценки возможных рисков. В результате проводимое исследование имеет высокую значимость теоретического и практического уровня и приемлемый уровень рисков.

5. Проведена оценка ресурсоэффективности проекта (4,55 по 5- бальной шкале), что говорит об эффективности реализации данного научно-технического проекта.

Следует отметить важность для проекта в целом проведенных в данной главе работ, которые позволили объективно оценить эффективность проводимого научно-технического исследования.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4ТМ61	Самарканову Фархату Жанатовичу

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отдел школы</b>	<b>Отделение материаловедения</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>1. <b>Объект исследования</b> – нанопорошки стали 316L и сплава металлов TiAl;                  2. <b>Метод исследования</b> – математическое моделирование, работа с установкой по получению нанопорошков;                  3. <b>Рабочая зона</b> – лаборатория тонкодисперсных материалов института оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева СО РАН;                  4. <b>Область применения</b> – стереолитография металлами, металлургическая промышленность.</p>
---	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)</li> </ul>	<p>1.1 Вредные факторы рабочей зоны:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Недостаточная освещенность рабочей зоны: Световой поток от каждой лампы составляет 2400 лк. Произведен расчет рекомендуемого светового потока, который составляет 2898 лк. Выбраны лампы ЛХБ40 с потоком 3100 лк.</li> <li>- Высокий уровень шума от работы электроустановок в лаборатории: Уровень шума в рабочей зоне составляет 72 дБ. предельный допустимый уровень звукового давления для данного типа помещения составляет 60 дБ. В качестве индивидуального средства защиты применяются противошумные наушники СОМЗ-3.</li> <li>- Электромагнитное излучение в рабочей зоне: Энергетическая экспозиция в диапазоне частот 30 кГц – 3 МГц: По эл-ой составляющей <math>\dot{E}E = 5300 \left(\frac{B}{M}\right)^2 \cdot ч</math>, по ПДУ <math>\dot{E}E \leq 20000 \left(\frac{B}{M}\right)^2 \cdot ч</math>. По магнитной составляющей <math>\dot{E}H = 280 \left(\frac{A}{M}\right)^2 \cdot ч</math>, по ПДУ <math>\dot{E}H \leq 200 \left(\frac{A}{M}\right)^2 \cdot ч</math>. Применяемые средства защиты: экранирование, корпус установки помещен в металлический кожух, высоковольтные кабели помещены в экранирующие лотки, экран ЭВМ оснащен приэкраным фильтром.</li> <li>- Раздражение органов дыхания при вдыхании нанопорошка. Нанопорошки титана и алюминия в воздухе рабочей зоны не образуют токсичных веществ и относятся к четвертому классу опасности. Предусмотрены следующие меры</li> </ul>
---	--

	<p>защиты: костюм хлопчатобумажный, резиновые перчатки, противоаэрозольный респиратор.</p> <p>1.2 Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Повышенное значение напряжение до 30 кВ, повышенное значение электрического тока до 60 кА.</li> </ul> <p>Применяемые средства защиты от поражения электрическим током: установка ограждений и барьеров, размещение вне зоны досягаемости, изоляция токоведущих частей, защитное заземления, уравнение потенциалов, все сотрудники лаборатории проходят соответствующие инструктажи, имеют группу допуска по электробезопасности не меньше второй.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Источники механических опасностей, какие-либо движущиеся механизмы отсутствуют.</li> <li>- Источники термических опасностей отсутствуют, все токоведущие части установки, которые могут нагреваться, изолированы. Практически вся энергия, запасенная в конденсаторных батареях, выделяется в взрывающемся проводнике.</li> </ul>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- защита селитебной зоны</li> <li>- анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>- разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>2.1 Селитебная зона ускорителя находится на территории лаборатории тонкодисперсных материалов института оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева СО РАН.</p> <p>2.2 Возможно попадание порошка в атмосферу при переносе контейнера с нанопорошком из установки в бокс для пассивации.</p> <p>Меры защиты: получение нанопорошков осуществляется в среде инертных газов, что минимизирует выбросы в атмосферу. Также, в лаборатории предусмотрена общая система приточной вентиляции с рециркуляцией воздуха согласно СНиП 41-01-2003.</p> <p>2.3 Воздействие установки на литосферу и гидросферу исключено, т.к. отсутствуют выбросы продуктов работы установки в литосферу и гидросферу. Отходы в виде отработанных конденсаторных батарей утилизируются на специализированных заводах.</p> <p>2.4 Экологическая безопасность отражена в документах: ПБ 11-555-03 «Правила безопасности при производстве порошков и пудр из алюминия, магния и сплавов на их основе»; ПБ 11-588-03 «Правила безопасности при производстве губчатого титана и титановых порошков».</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>- выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>- разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>3.1 Перечень возможных ЧС: короткое замыкание в электрической цепи установки, возгорание оборудования.</p> <p>В качестве наиболее вероятной ситуации рассматривается пожар.</p> <p>3.2 Превентивные меры по предупреждению возгорания: соблюдать требования безопасности при работе в помещении, очищать помещения от горючих отходов и мусора, проводить проверки состояния проводки установки, не реже одного раза в полугодие проводить практические</p>

	<p>тренировки всех задействованных для эвакуации работников</p> <p>3.3 Действия при возникновении ЧС: прекратить все работы в здании, незамедлительно оповестить пожарную охрану по телефону, принять возможные меры по ликвидации последствий ЧС: эвакуация людей, тушение пожара, в случае угрозы жизни людей немедленно организовать их спасение .</p>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Правовые и организационные вопросы отражены в документах: ПБ 11-555-03 «Правила безопасности при производстве порошков и пудр из алюминия, магния и сплавов на их основе»; ПБ 11-588-03 «Правила безопасности при производстве губчатого титана и титановых порошков».</p>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения контроля и диагностики	Ахмеджанов Рафик Равильевич			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Самарканов Фархат Жанатович		

## **5 Социальная ответственность**

### **Введение**

В данной выпускной квалификационной работе производится анализ технологии добычи нанопорошков стали 316L и сплава металлов TiAl с использованием метода электрического взрыва проводника для определения параметров процесса, позволяющих получать нанопорошки заданных размеров.

Целью работы является, с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics, определение необходимых параметров ЭВП и их дальнейшее экспериментальное подтверждение на установке по добыче нанопорошков.

Данный раздел ВКР посвящен выполнению анализа и разработке мер по обеспечению благоприятных условий труда в рабочей зоне. Рабочей зоной является лаборатория высокодисперсных материалов института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

Произведен анализ вредных факторов в лаборатории, где производится добыча нанопорошков, таких как: отклонение показателей микроклимата в помещении, повышения уровня шума, превышение электромагнитных излучений.

### **5.1 Производственная безопасность**

#### **5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования**

В процессе жизнедеятельности человек подвергается воздействию опасностей и в своей трудовой деятельности. Эта деятельность осуществляется в пространстве, называемом производственной средой. В условиях производства на человека в основном действуют техногенные, т.е. связанные с техникой, опасности, которые принято называть опасными и вредными производственными факторами.

*Опасным производственным фактором (ОПФ)* называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к травме или к другому внезапному резкому ухудшению здоровья. Травма – это повреждение тканей организма и нарушение его функций внешним воздействием. Травма является результатом несчастного случая на производстве, под которым понимают случай воздействия опасного производственного фактора на работающего при выполнении им трудовых обязанностей или заданий руководителя работ.

*Вредным производственным фактором (ВПФ)* называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

При работе в кабинете персонал может столкнуться с воздействием физически опасных и вредных производственных факторов [50].

Таблица 22 - Вредные и опасные факторы

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Математическое моделирование на персональном компьютере, работа в лаборатории (работа на установке по добыче нанопорошков)	1. Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны 2. Повышенный уровень шума на рабочем месте 3. Повышенная или пониженная влажность воздуха 4. Наличие электромагнитных полей	Электрический ток	СанПиН 2.2.4.548-96.[51]; ГОСТ 12.1.003-83.[52]; ГОСТ 12.1.019.[56]; ГОСТ 12.1.038 – 82.[57]

Микроклимат производственных помещений определяется совокупным воздействием на организм человека температуры, влажности, скорости движения воздуха, теплового излучения нагретых поверхностей. Микроклимат различных производственных помещений зависит от колебаний внешних

метеорологических условий, времени дня, года, особенностей производственного процесса и систем отопления и вентиляции. [51].

Согласно [51] работа в кабинете относится к классу работ с интенсивностью энергозатрат 120 - 150 ккал/час. В помещениях, где работа с персональной электронной вычислительной машиной является основной, должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата для категории работ 1а и 1б в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами микроклимата производственных помещений.

Таблица 23 – Параметры микроклимата для производственных помещений

Период года	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Температура воздуха в помещении	22 – 24 °С
	Относительная влажность	40 – 60 %
	Скорость движения воздуха	до 0,1 м/с
Теплый	Температура воздуха в помещении	23 – 25°С
	Относительная влажность	40 – 60 %
	Скорость движения воздуха	0,1 – 0,2 м/с

Для обеспечения достаточного постоянного и равномерного нагревания воздуха в рабочем кабинете в холодный период года используется отопление. Температуру в помещении следует регулировать с учетом тепловых потоков от оборудования.

С целью поддержания параметров микроклимата в допустимых пределах, а также комфортные условия работы обслуживающего персонала применяется кондиционирование воздуха. Кондиционирование воздуха обеспечивает поддержание параметров микроклимата в течение всех сезонов года, очистку воздуха от пыли и вредных веществ.

Другим вредным фактором, оказывающим пагубное воздействие на здоровье человека, является шум. Уровень шума в рабочей зоне составляет 72 дБ.

Согласно СН 2.2.4/2.1.8.562–96 предельно допустимые уровни (ПДУ) звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для измерительных и аналитических работ в кабинете представлены в таблице 3[66,52].

Таблица 24 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест

п/п	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (в дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
	Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в рабочих комнатах конторских помещений, в лабораториях	93	79	70	68	58	55	52	52	49	60

Влияние шума на слуховой анализатор проявляется в ауральных эффектах, которые, главным образом, заключаются в медленно прогрессирующем понижении слуха по типу неврита слухового нерва (кохлеарный неврит). Подвергающиеся шумовому воздействию люди, чаще всего жалуются на головные боли, которые могут иметь разную интенсивность и локализацию, головокружение при перемене положения тела, снижение памяти, повышенную утомляемость, сонливость, нарушения сна, эмоциональную неустойчивость, снижение аппетита, потливость, боли в области сердца. Влияние шума сказывается на функциях эндокринной и иммунной систем организма, в частности это может проявляться в виде трех главных биологических эффектов: снижение иммунитета к инфекционным болезням; снижение иммунитета, направленного против развития опухолевых процессов; появление благоприятных условий для возникновения и развития аллергических и аутоиммунных процессов.

Источниками шума при работе в кабинете являются персональная электронная вычислительная машина, необходимая для контроля работы автономного комплекса электроснабжения и устройство для кондиционирования воздуха. При обеспечении нормальных условий микроклимата уровень шума в кабинете не будет превышать нормы.

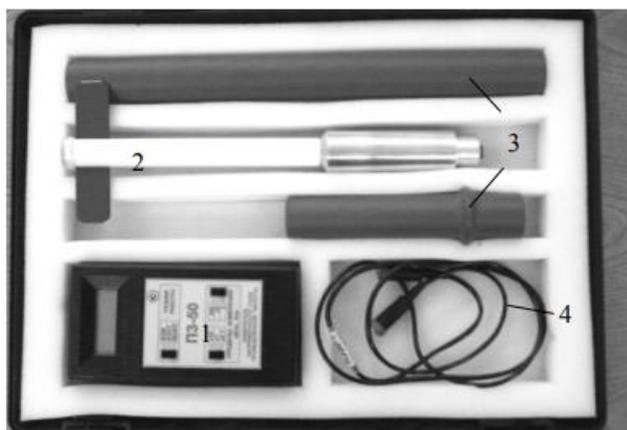
В качестве средств индивидуальной защиты применяются противошумные наушники СОМЗ-3 ПУМА. ушники предназначены для защиты органа слуха от шума с уровнем не более 115 дБ (SNR = 30 дБ). Группа А.



Рисунок 47 – Наушники СОМЗ-3 ПУМА

Так как в лаборатории находится установка по наработке нанопорошков, которую можно охарактеризовать как по мощности, так и по режиму работы, естественным условием является рассмотрение электромагнитного излучения. Измерение уровня электромагнитного излучения, её электрической и магнитной составляющей производится с помощью следующих устройств:

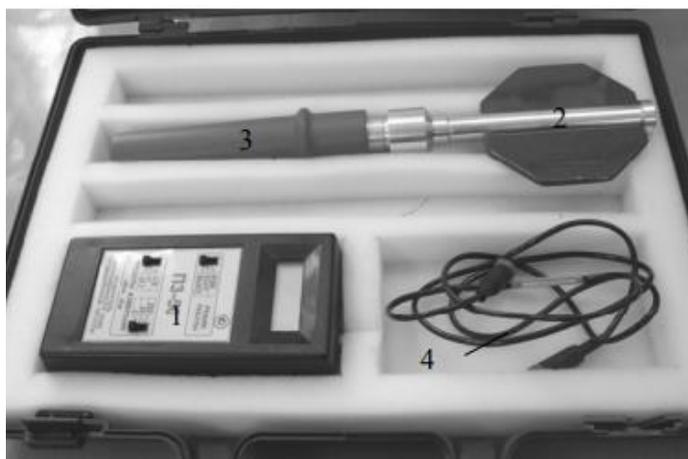
- 1) Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50А (рисунок 48) предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряженности электрического поля промышленной частоты, возбуждаемого вблизи электроустановок высокого напряжения в диапазоне от 0,01 до 100 кВ/м.



1– устройство отсчетное УОЗ-50; 2– антенна преобразователь ЕЗ-50; 3–  
 изоляционные ручки; 4– соединительный кабель

Рисунок 48 - Внешний вид прибора ПЗ-50А

2) Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50Б (рисунок 49) предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряженности магнитного поля промышленной частоты, возбуждаемого вблизи электроустановок высокого напряжения в диапазоне от 0,1 до 1800 А/м



1– устройство отсчетное УОЗ-50; 2– антенна преобразователь НЗ-50; 3–  
 изоляционная ручка; 4– соединительный кабель

Рисунок 49 - Внешний вид прибора ПЗ-50Б

Измерения энергетической экспозиции показали следующие результаты:

- По эл-ой составляющей  $\text{ЭЭе} = 5300 \left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)^2 \cdot \text{ч}$ , по ПДУ  $\text{ЭЭе} \leq 20000 \left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)^2 \cdot \text{ч}$ ;
- По магнитной составляющей  $\text{ЭЭн} = 280 \left(\frac{\text{А}}{\text{м}}\right)^2 \cdot \text{ч}$ , по ПДУ  $\text{ЭЭн} \leq 200 \left(\frac{\text{А}}{\text{м}}\right)^2 \cdot \text{ч}$ .

Ранными клиническими проявлениями последствия воздействия электромагнитного излучения на организм человека являются функциональные нарушения со стороны нервной системы, проявляющиеся в виде вегетативных дисфункций нерва стенического и астенического синдрома. Лица, продолжительное время находившиеся в зоне электромагнитного излучения, имеют жалобы на слабость, раздражительность, быструю утомляемость, ослабление памяти, расстройства сна. Зачастую этим симптомам сопутствуют расстройства вегетативных функций. Нарушения со стороны сердечно-сосудистой системы проявляются, в большинстве случаев, нейроциркуляторной дистонией: лабильность пульса и артериального давления, склонность к гипотонии, боли в области сердца. Отмечаются также фазовые изменения состава периферической крови с последующим развитием умеренной лейкопении, нейropении, эритроцитопении. Изменения костного мозга носят характер реактивного компенсаторного напряжения регенерации. Обычно эти изменения возникают у лиц по роду своей работы постоянно находившихся под действием электромагнитного излучения с достаточно большой интенсивностью. Работающие с магнитными и электромагнитными полями, а также население, живущее в зоне действия ЭМП жалуются на раздражительность. Через 1-3 года у некоторых появляется чувство 104 внутренней напряженности, суетливость. Нарушаются внимание и память. Возникают жалобы на малую эффективность сна и утомляемость [67].

Установка находится в металлическом корпусе, являющимся защитным экраном от электромагнитного излучения. Так как величина электромагнитного излучения незначительна, нет необходимости в использовании дополнительных средств коллективной и индивидуальной защиты.

Источником электромагнитных излучений в лаборатории также является дисплей ПЭВМ. Монитор компьютера генерирует рентгеновское, ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. Согласно [53] напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см

вокруг видеодисплейного терминала (ВДТ) не должна превышать 25 В/м в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц; 2,5 В/м в диапазоне от 2 до 400 кГц. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц 250 нТл, и 25 нТл в диапазоне от 2 до 400 кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В [52].

Согласно [53] конструкция ВДТ и ПЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от корпуса не более 0,1 мбэр/ч (100 мкР/ч). Предел дозы облучения для работников ВЦ (операторы, программисты) составляет 0,5 бэр/год.

Таблица 25 – Средства защиты от излучений оптического диапазона и электромагнитных полей ПЭВМ

№	Средство профилактики неблагоприятного влияния ПЭВМ	Оказываемое профилактическое действие
1	Приэкранные защитные фильтры для видеомониторов	Снижают уровень напряженности электрического и электростатического поля, повышают контрастность изображения, уменьшают блики.
2	Нейтрализаторы электрических полей промышленной частоты	Снижают уровень электрического поля промышленной частоты (50 Гц)
3	Очки защитные со спектральными фильтрами ЛС и НСФ, разрешенные Минздравом России для работы с ПЭВМ	Профилактика компьютерного зрительного синдрома, улучшение визуальных показателей видеомониторов, повышение работоспособности, снижение зрительного утомления

В кабинете лаборатории в настоящий момент применяются лампы с недостаточным световым потоком ( $F = 2400$  лм).

В кабинете, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении должны быть соблюдены нормы освещенности и качественные показатели освещения в соответствии с требованиями СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [54]. Помещение должны иметь естественное и искусственное освещение. Естественное освещение должно осуществляться через боковые светопроемы. Искусственное освещение должно осуществляться системой общего равномерного освещения.

Освещенность рабочей поверхности должна составлять 300-500 лк [54]. Коэффициент пульсации освещенности не более 15 %. Коэффициент естественной освещенности КЕО в кабинетах и рабочих комнатах должен быть не ниже 1%. –при боковом освещении и 3% – при верхнем или комбинированном освещении. Коэффициент совмещенной освещенности КЕО в кабинетах и рабочих комнатах должен быть не ниже 0,6%. –при боковом освещении и 1,8% – при верхнем или комбинированном освещении

Произведем расчет искусственного освещения для рабочего кабинета, в котором производится контроль состояния автономного комплекса электро-снабжения. Кабинет имеет следующие размеры: ширина – 4 м, длина – 5 м, высота – 3 м, площадь –20 м<sup>2</sup>.

Порядок расчёта:

- 1) выбор типа светильников,
- 2) определение количества светильников,
- 3) определение мощности источников света.

В помещении предусмотрено общее равномерное освещение, для которого применяются люминесцентные лампы типа ЛХБ (лампы холодно-белого цвета), для которых используется светильник типа ШОД-2-40 (длиной 1228 мм, шириной 284 мм). Размещение светильников в помещении определяется следующими размерами [55]:

$H = 3$  м– высота помещения;

$h_c = 0,2$  м – расстояние светильников от перекрытия (свес);

$h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса;

$h_p$  – высота рабочей поверхности над полом;

$h$  – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью ( $h = h_n - h_p$ );

$L$  – расстояние между соседними светильниками или рядами;

$l$  – расстояние от крайних светильников или рядов до стены (оптимальное расстояние / рекомендуется принимать равным  $L/3$ );

$\lambda$  – интегральный критерий оптимальности расположения светильников.

Высота подвеса составляет:

$$h_n = H - h_c = 3 - 0,2 = 2,8 \text{ м} \quad (18)$$

Учитывая, что  $h_p = 1$  м, найдём  $h = h_n - h_p = 2,8 - 1 = 1,8$  м.

Для светильников типа ШОД  $\lambda = 1,1$ , поэтому

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 1,8 = 1,98 \text{ м}; \quad (19)$$

$$l_a = \frac{L}{3} = \frac{1,98}{3} = 0,66 \text{ м}; \quad (20)$$

$$l_b = \frac{4 - 2 \cdot 0,284 - 1,98}{2} = 0,726 \text{ м}.$$

На основе данных расчетов рекомендуется разместить светильники в 2 ряда, в каждом из которых можно установить 2 светильника типа ШОД-2 мощностью 40 Вт. При этом интервал между светильниками в ряду составит примерно 1,224 м. Учитывая, что в каждом светильнике установлено по две лампы, общее число ламп в помещении составит  $(2 \cdot 2) \cdot 2 = 8$ .

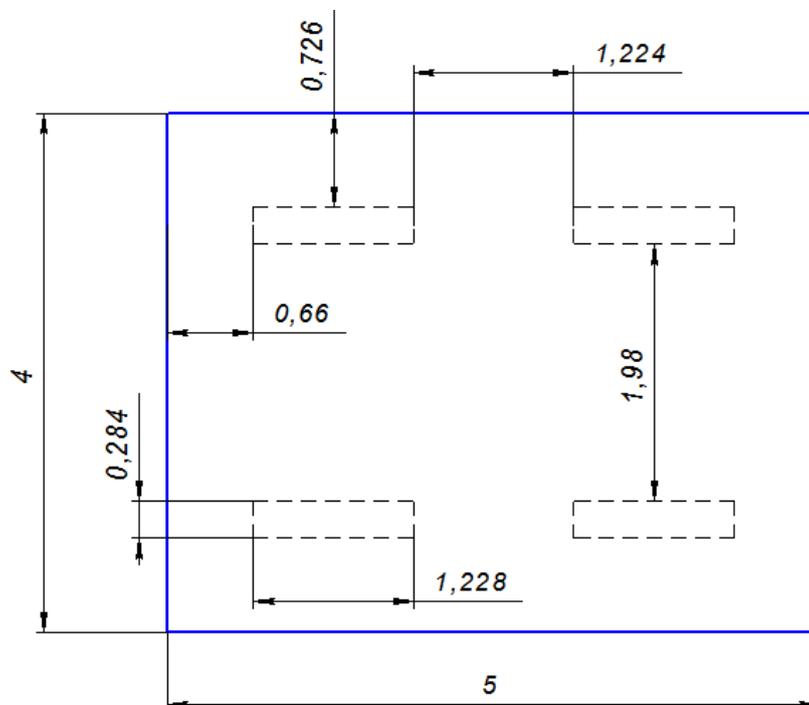


Рисунок 50 – План помещения и размещения светильников (размеры указаны в метрах)

Расчет общего равномерного освещения выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отраженный от потолка и стен. Световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$F = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot \eta}, \quad (21)$$

где  $E_n$  – нормируемая минимальная освещенность (для данной категории помещений  $E_n = 300$ лк) [7];

$S$  – площадь освещаемого помещения (20 м<sup>2</sup>);

$K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, запыленность ( $K_3 = 1,5$  - для помещений с малым выделением пыли);

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп берется равным 1,1);

$n$  – число ламп (8);

$\eta$  – коэффициент использования светового потока – показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен  $p_c$  и потолка  $p_n$ .

Расчет индекса помещения осуществляется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (a + b)}, \quad (22)$$

где  $S$  – площадь помещения (20 м<sup>2</sup>);

$h$  – высота подвеса светильников над рабочей поверхностью (1,8 м);

$a, b$  – длина и ширина помещения ( $a = 5$  м;  $b = 4$  м).

В результате  $i = \frac{20}{1,8 \cdot (5 + 4)} = 1,23$ .

Коэффициенты отражения  $p_c$  и  $p_n$  имеют следующие значения [55]:

-  $p_c = 50\%$  (стены свежепобеленные с окнами без штор);

-  $p_n = 70\%$  (потолок свежепобеленный).

Для полученных значений  $p_c$ ,  $p_n$  и  $i$  коэффициент использования светового потока  $\eta = 42,72\%$ , или  $\eta = 0,427$ . Подставляя полученные значения в формулу, найдем значение минимально требуемого светового потока для рабочей аудитории:

$$F = \frac{300 \cdot 20 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{8 \cdot 0.427} = 2898 \text{ лм}$$

Рассчитав световой поток  $F$ , зная тип лампы, выберем ближайшую стандартную лампу и определим электрическую мощность всей осветительной системы. Ближайшая стандартная лампа – ЛХБ40 Вт с потоком 3100 лм [55]. Напряжение сети 220 В. По результатам данного расчета можно сделать следующий вывод: согласно [54] в рабочей аудитории (размерами 5 x 4 x 3 м) со свежепобеленными потолком и стенами, с окнами без штор следует использовать 4 светильника типа ШОД-2-40 с люминесцентными лампами ЛХБ мощностью 40 Вт с потоком 3100 лм.

Так как, основная часть работы связана с получением и изучением нанопорошков алюминия и титана ниже приведены ГОСТы и нормативы при работе с данными порошками.

Согласно ГН 2.2.5.1313-03 титан относится к 4 классу опасности (умеренно опасное вещество), алюминий – к 3 классу опасности (опасное вещество). В таблице 26 представлены предельно допустимые концентрации (ПДК) тантала в воздухе рабочей зоны

Таблица 26 – предельно допустимые концентрации (ПДК) алюминия и титана в воздухе рабочей зоны

Элемент	Величина ПДК (мг/м3)	Преимущественное агрегатное состояние в воздухе	Класс опасности	Особенности действия на организм
Алюминий и его сплавы	6/2	а	3	Ф
Титан	-/10	а	4	Ф

Примечание: 4 класс – умеренно опасные; 3 – опасные; а – аэрозоль; Ф - аэрозоли, преимущественно фиброгенного действия.

Для каждого работника, связанного с разработкой с нанопорошками, предусмотрены следующие средства индивидуальной защиты:

- 1) костюм хлопчатобумажный, куртка на утепляющей прокладке по ГОСТ 1126;
- 2) брезентовые рукавицы по ГОСТ 12.4.010;
- 3) резиновые перчатки по ГОСТ 20010;
- 4) хлопчатобумажные перчатки по ГОСТ 12.4.183 и ГОСТ 5007;
- 5) ботинки на кожаной подошве по ГОСТ 28507 и ГОСТ 12.4.137;
- 6) противоаэрозольный респиратор по ГОСТ 12.4.004;

Работы с порошками выполнялись, основываясь на ГОСТ 13084-88. В основных требованиях безопасности указано:

1) Титан и его соединения в воздухе рабочей зоны не образуют токсичных веществ и относятся к четвертому классу опасности.

2) Лабораторные помещения, в которых выполняется химическая обработка навесок титана, должны быть оборудованы вентиляционными системами по ГОСТ 12.4.021. 88

3) Пожарная безопасность лабораторных помещений должна обеспечиваться в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004.

4) К работе в аналитической лаборатории должны допускаться лица, прошедшие инструктаж в соответствии с ГОСТ 12.0.004.

### **5.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований**

Электрический ток, проходя через живой организм, оказывает термическое, электролитическое, биологическое действия. Термическое действие проявляется в ожогах, нагреве и повреждении кровеносных сосудов, перегреве сердца, мозга и других органов, что вызывает в них функциональные расстройства. Электролитическое действие проявляется в разложении органической жидкости, в том числе крови, что вызывает значительное нарушение ее состава,

а также ткани в целом. Биологическое действие выражается в нарушении внутренних биоэлектрических процессов. Например, взаимодействуя с биотоками организма, внешний ток может нарушить нормальный характер их воздействия на ткани и вызвать непроизвольное сокращение мышц. Поэтому необходимо соблюдение мер электробезопасности [56, 57].

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (помещения особо опасные).

Лаборатория относится ко второй группе помещений в отношении опасности поражения людей электрическим током [58] – особо опасное помещение, так как установка для получения нанопорошков методом электрического взрыва проводника работает в интервале напряжений от 14000 В до 30000 В.

При работе с установкой производится только операторская работа. Высоковольтная часть установки находится в закрытом корпусе, который заземлен, и находится вне зоны досягаемости оператора. Для обеспечения безопасности и полного исключения возможности поражения электрическим током, установка находится в полностью изолированном боксе и также имеет заземление. Допуск к работе на данной установке имеют сотрудники прошедшие специальную подготовку и имеющие IV категорию по электробезопасности.

Для защиты от поражения электрическим током в нормальном режиме должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты от прямого прикосновения: основная изоляция токоведущих частей:

- получение персоналом соответствующей группы электробезопасности;
- ограждения и оболочки;
- установка барьеров;
- размещение вне зоны досягаемости;

Для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты при косвенном прикосновении:

- защитное заземление;
- автоматическое отключение питания;
- уравнивание потенциалов;
- двойная или усиленная изоляция;
- защитное электрическое разделение цепей;
- изолирующие (непроводящие) помещения, зоны, площадки.

Применение двух и более мер защиты не должно оказывать взаимного влияния, снижающего эффективность каждой из них.

Защиту при косвенном прикосновении следует выполнять во всех случаях, если напряжение в электроустановке превышает 50 В переменного и 120 В постоянного тока.

Заземляющее устройство [63], используемое для заземления электроустановок должно удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к заземлению этих электроустановок: защиты людей от поражения электрическим током при повреждении изоляции, условиям режимов работы сетей, защиты электрооборудования от перенапряжения и т.д. в течение всего периода эксплуатации.

В первую очередь должны быть соблюдены требования, предъявляемые к защитному заземлению. Требуемые значения напряжений прикосновения и сопротивления заземляющих устройств при стекании с них токов замыкания на землю и токов утечки должны быть обеспечены при наиболее неблагоприятных условиях в любое время года. Заземляющие устройства должны быть механически прочными, термически и динамически стойкими к токам замыкания на землю.

Для отключения электросетей на вводах имеются рубильники. Отключение всей сети, за исключением дежурного освещения, производится общим рубильником. В целях предотвращения электротравматизма

запрещается: 1) работать на неисправных электрических приборах и установках; 2) перегружать электросеть; 3) переносить и оставлять без надзора включенные электроприборы; 4) работать вблизи открытых частей электроустановок, прикасаться к ним; 5) загромождать подходы к электрическим устройствам.

При поражении электрическим током необходимо как можно быстрее освободить пострадавшего от действия электрического тока, отключив электроприбор, которого касается пострадавший. Отключение производится с помощью рубильника. При невозможности быстрого отключения электроприбора необходимо освободить пострадавшего от токоведущих частей деревянным или другим не проводящим ток предметом источник поражения. Во всех случаях поражения электрическим током необходимо вызвать врача. Все сотрудники лаборатории каждые полгода проходят экзамен по электробезопасности и имеют категорию не ниже второй.

## **5.2 Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения - это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

В данной работе нанопорошки титана и алюминия получали методом электрического взрыва проводника, который в данный момент является одним из самых экологически безвредных. Получение порошков осуществляется в среде инертных газов или воздухе без добавления различных химических и других добавок, что полностью исключает вредные выбросы в атмосферу. Метод электрического взрыва проводника является не очень энергозатраты, что также положительно сказывается на его экологической значимости. Работа установки сопровождается минимальным выделением тепла. Практически вся энергия тратится на нагрев непосредственно проводника и его взрыв, что значительно повышает КПД электровзрывного метода по сравнению с другими.

Работа установки не влечет за собой какое-либо негативное воздействие на окружающую среду, за исключением отходов в виде списанных аккумуляторных батарей. Утилизация аккумуляторных батарей необходима для уменьшения количества токсичных веществ в твердых бытовых отходах. Вещества, которые в них используются, очень вредны для окружающей среды. Свинец составляет до 60% масса батареи, а раствор серной кислоты химически очень агрессивен. Свинец является токсичным металлом, попадая в организм, он накапливается в костях, вызывая их разрушение.

Полная утилизация свинцово-кислотных аккумуляторов может происходить только на специальных заводах. Типовая схема переработки отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов на заводе [58]:

- слив (удаление) электролита;
- нейтрализация электролита в герметических камерах при высокой температуре;
- дробление корпуса аккумулятора на станках-дробилках;
- фильтрация – отделение свинцово-кислотной пасты от смеси обломков пластика и металла;
- разделение пластика и металла в емкостях с водой;
- отправка пластика на гранулирование;
- нейтрализация обломков металла и пасты, снятой с фильтра;
- отделение свинца от других металлов в сушильных печах;
- доочистка свинца в тигле (специальная емкость, где на расплавленном свинце образуется и снимается верхняя корка);
- розлив свинца в формы.

### **5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Под производственной аварией понимают внезапную остановку работы или нарушение процесса производства, приводящую к повреждению или уничтожению материальных ценностей. Аварии могут возникать в результате стихийного бедствия, а также нарушения технологического регламента, правил

эксплуатации машин, оборудования и установленных мер безопасности. Оперативная часть плана ликвидации возможных аварий предусматривает способы оповещения об аварии, выхода людей из опасных зон, включение систем пожаротушения. План ликвидации аварий изучает весь персонал, а также работники спасательной станции и пожарной части.

Помещение лаборатории относится к категории В4, так как в ней происходят работы с нанопорошками которые могут самовоспламенятся при контакте с воздухом. [64]).

Системы противопожарной защиты здания должны обеспечивать возможность эвакуации людей в безопасную зону до наступления предельно допустимых значений опасных факторов пожара.

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91 и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009-83.

Оповещение людей о пожаре, управление эвакуацией людей и обеспечение их безопасной эвакуации при пожаре в здании должны осуществляться одним из следующих способов или комбинацией следующих способов [65]:

- 1) подача световых, звуковых и (или) речевых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей;
- 2) трансляция специально разработанных текстов о необходимости эвакуации, путях эвакуации, направлении движения и других действиях, обеспечивающих безопасность людей и предотвращение паники при пожаре;
- 3) размещение и обеспечение освещения знаков пожарной безопасности на путях эвакуации в течение нормативного времени;
- 4) включение эвакуационного (аварийного) освещения;
- 5) дистанционное открывание запоров дверей эвакуационных выходов;
- 6) обеспечение связью пожарного поста (диспетчерской) с зонами оповещения людей о пожаре;

Пожарные оповещатели, устанавливаемые на объекте, должны обеспечивать однозначное информирование людей о пожаре в течение времени эвакуации, а также выдачу дополнительной информации, отсутствие которой может привести к снижению уровня безопасности людей.

Обучение лиц мерам пожарной безопасности осуществляется путем проведения повторного инструктажа один раз в год.

Помещение, в котором расположена лаборатория, оснащено пожарными кранами с пожарными рукавами. На видном месте висит план эвакуации из лаборатории. В помещении самой лаборатории имеются средства первичного пожаротушения, такие как песок, огнетушитель, асбестовые покрывала и т.д.

Распоряжением по лаборатории из числа сотрудников назначен человек, который организует все противопожарные мероприятия, получив инструктаж местной пожарной команды. Все сотрудники лаборатории обучены правилам обращения с огне- и взрывоопасными веществами, газовыми приборами, а также умеют обращаться с противогазом, огнетушителем и другими средствами пожаротушения, имеющимися в лаборатории.

Причинами возгорания в кабинете могут служить:

- несоблюдение техники безопасности;
- короткое замыкание (в случае неисправности блокировок, средств автоматического отключения питания);

Поэтому во избежание пожароопасных ситуаций необходимо соблюдать следующие требования [59,60,61,62]:

- соблюдать требования безопасности при работе в помещении;
- очищать помещения от горючих отходов и мусора;
- определить места и допустимое количество единовременного хранения сырья;
- оборудовать специально отведённые места для курения;
- запрещается загромождать эвакуационные пути и выходы различными материалами и изделиями, оборудованием, мусором и т.п.

– пожарные гидранты должны находиться в исправном состоянии, а в зимнее время должны быть утеплены и очищаться от снега и льда;

– все средства пожаротушения должны иметь соответствующие сертификаты.

– дороги, проезды и подъезды к зданию должны быть всегда свободными для проезда пожарной техники, содержаться в исправном состоянии, а зимой быть очищенными от снега и льда;

– не реже одного раза в полугодие проводить практические тренировки всех задействованных для эвакуации работников.

Порядок действий при обнаружении пожара или признаков горения и меры по локализации и ликвидации последствий ЧС:

– прекратить все работы в здании;

– незамедлительно оповестить пожарную охрану по телефону, назвав адрес объекта, место возникновения пожара и свою фамилию;

– принять возможные меры по эвакуации людей, тушению пожара и сохранности материальных ценностей;

– в случае угрозы жизни людей немедленно организовать их спасение, используя для этого имеющиеся силы и средства;

– проверить включение автоматических систем противопожарной защиты (оповещения людей о пожаре, пожаротушения, противодымной защиты);

– при необходимости отключить электроэнергию (за исключением систем противопожарной защиты), выполнить другие мероприятия, способствующие предотвращению развития пожара;

– удалить за пределы опасной зоны всех работников, не участвующих в тушении пожара;

– осуществить общее руководство по тушению пожара до прибытия подразделения пожарной охраны;

– обеспечить соблюдение требований безопасности работниками, принимающими участие в тушении пожара;

- одновременно с тушением пожара организовать эвакуацию и защиту материальных ценностей;
- организовать встречу подразделений пожарной охраны и оказать помощь в выборе кратчайшего пути для подъезда к очагу пожара;
- сообщать подразделениям пожарной охраны, привлекаемым для тушения пожара и проведения связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ, сведения о перерабатываемых или хранящихся на объекте опасных, взрывчатых, сильнодействующих ядовитых веществах.

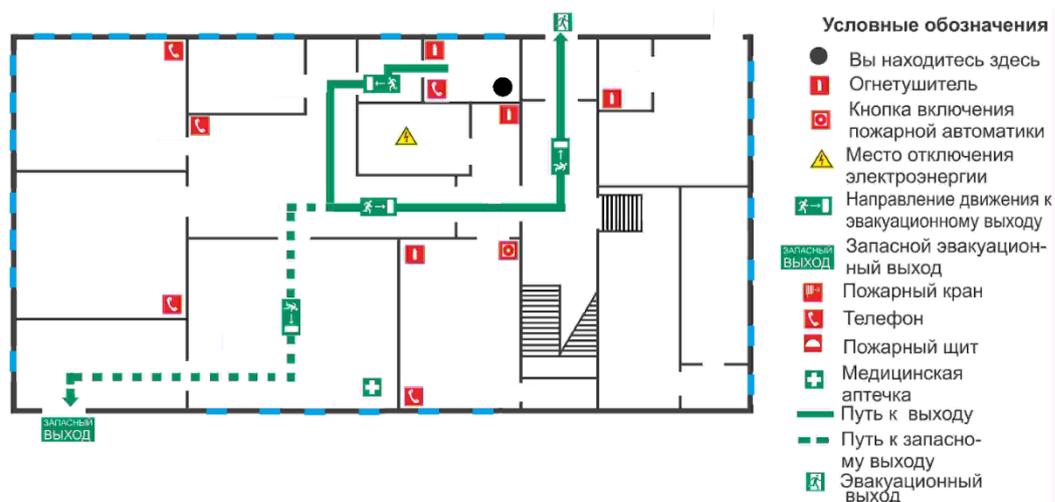


Рисунок 51 – План эвакуации

#### 5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно [52] при размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора) должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов – не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПЭВМ в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом.

Рабочие места с ПЭВМ при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 - 2,0 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ.

Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений [68].

### **Заключение**

Основным фактором, влияющим на производительность людей, работающих в закрытом помещении, являются комфортные и безопасные условия труда. Условия труда сотрудников в рабочей комнате характеризуются возможностью воздействия на них следующих производственных факторов: шума,

тепловыделений, действие микроклимата, недостаточной освещённости, параметров технологического оборудования и рабочего места.

Таким образом, в данном разделе были проанализированы вредные и опасные факторы, влияющие на здоровье человека в закрытом помещении. Были отмечены источники негативного воздействия, приведены допустимые нормы с необходимой размерностью, а также средства коллективной и индивидуальной защиты.

## Conclusion

Data based on the experiments results presents that it is possible to obtain powders based on homogeneous mixtures of micro- and nanoparticles by means of the electric explosion of wire method. Design of the separator allows separation of particles with sizes of 50  $\mu\text{m}$  and more. According to the experimental data, mass content of particles with dimensions greater than 50  $\mu\text{m}$  does not exceed (5 – 7) wt. % of the total mass of powder obtained in the separator powder collector (figure 27) and in the cyclone powder collector.

Obtained samples have a normal-logarithmic particle size distribution. Increase in the energy input leads to decrease in the average particle size in the samples. Change in the energy input into the wires within the investigated interval does not lead to a phase composition change of the samples.

Experimental data shows that in order to obtain a homogeneous mixture of micro- and nanoparticles of 316L alloy, it is necessary to introduce energy within the range of (0,7 – 1,0)  $E_c$ . Introduction of energy less than 0,7  $E_c$  causes the destruction of the main mass of the wire into droplets, dimensions of which are comparable with the diameter of a wire.

To obtain a homogeneous mixture of micro- and nanoparticles of the Ti-Al alloy with an atomic composition of the order of 50/50 at. %, it is necessary to introduce amount of energy in the Ti and Al wires, which lies in the interval of (1,0 – 1,4)  $E_c$ . Introduction of energy less than  $E_c$  leads to destruction of the bulk of titanium wire into drops, dimensions of which are comparable with the wire diameter.

## Bibliography

1 ISO/ASTM 52900:2015 - Additive manufacturing - General principles – Terminology / International Organization for Standardization [electronic source] access mode: <https://www.iso.org/standard/69669.html>

2 Zlenko M.A. Additive technologies in mechanical engineering / M.V. Nagaycev, V.M. Dovbysh // manual for engineers. – M. FSUE «NAMI» State Research Center of the Russian Federation, 2015. – PP. 220

3 David L. Bourella, Joseph J. Beaman, Jr.a, Ming C. Leub and David W. Rosenc., A Brief History of Additive Manufacturing and the Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / RapidTech [electronic source] access mode: [www.rapidtech.itu.edu.tr](http://www.rapidtech.itu.edu.tr).

4 Techel A., Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS) / Laser Institute of America [electronic source] access mode: <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing>

5 Sabina L. Campanelli et. al, Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process / Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, Italy [electronic source] access mode: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>

6 Osokin E.N. Powder metallurgy processes / E.N. Osokin, O.A. Artemyeva // IQI SFU, 2008 [electronic source] access mode: [http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/63/u\\_lectures.pdf](http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/63/u_lectures.pdf)

7 Louvis E. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology / Louvis E. et. Al. // Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom. – 2011. – Vol. 211. – P. 275 – 284

8 3-D Printing Manufacturing Process is Here; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community, UAS Vision [electronic source] access mode: <http://www.uasvision.com>

9 J. W. Oh. Analysis of Nano/Micro bimodal SUS316L powder behavior / J. W. Oh, R. Bollina, W. S. Lee, S. J. Park // *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*. - № 15 – 2015. - P.27 – 34

10 J. W. Oh. Analysis of compaction and sintering behavior of 316L stainless steel nano/micro bimodal powder / J. W. Oh, S. K. Ryu, W. S. Lee, S. J. Park // *Powder Technology*. - № 322 – 2017. – P.1 – 8

11 G.J. Fan. Plastic deformation and fracture of ultrafine-grained Al–Mg alloys with a bimodal grain size distribution / G.J. Fan, H. Choo, P.K. Liaw, E.J. Lavernia // *Acta Materialia*. - № 54 – 2006. – P.1759 – 1766

12 Vladimir A. Skripnyak. Mechanical Behavior of Light Alloys with Bimodal Grain Size Distribution / Vladimir A. Skripnyak, Evgeniya G. Skripnyak, Nataliya V. Skripnyak // *Applied Mechanics and Materials*. – Vol. 756 – 2015. – P. 205-213

13 Amir Afshar. Flow stress dependence on the grain size in alumina dispersion-strengthened copper with a bimodal grain size distribution / Amir Afshar, A. Simchi, // *Materials Science and Engineering* - № 518 - 2009 – P. 41–46

14 Andrea Garcí'A-Junceda. On the Role of Alloy Composition and Sintering Parameters in the Bimodal Grain Size Distribution and Mechanical Properties of ODS Ferritic Steels / Andrea Garcí' A-Junceda, Mo' Nica Campos, Nerea Garcí' A-Rodri'Guez, and Jose' Manuel Torralba // *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, Metallurgical And Materials Transactions*, - 2016. - P. 124-133

15 B. V. Mahesh. Bimodal grain size distribution: an effective approach for improving the mechanical and corrosion properties of Fe–Cr–Ni alloys / B. V. Mahesh, R. K. Singh Raman, C. C. Koch // *Ultrafine Grained Materials*, 2012. – P. 25-34

16 Isabell Hilger. Bimodal Grain Size Distribution of Nanostructured Ferritic ODS Fe–Cr Alloys / Isabell Hilger, Frank Bergner, and Thomas Weißgarber // *The American Ceramic Society*, – 2015. - № 98. – P. 3576 – 3581

17 Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C. Production methods and applications for high quality metal powders and sprayformed products.

Produktionsmethoden und Anwendungen für qualitativ hochwertige Metallpulver und spruhkompaktierte Halbzeuge / Stahl und Eisen. – Vol. 125 – № 4 – 2005

18 Tsantrizos P. G. et. al. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization / Pat. US № 5707419, date of issue: 13 Jan. 1998

19 Donachie M.J. Superalloys: a technical guide / M. Donachie, Jr., S. Donachie. -2nd ed. p/cm // ASM International ISBN 0-87170-749-7 – 2002

20 Fngelo H. C., Subramanian R. Powder Metalurge: Science, technology and application. Pulished dy Asoke K. Ghosh, PHI Learning Privated Limited / Connaught Circus, New Dehli - ISBN-978-81-203-32-81-2, 2008. – PP. 213

21 Lerner M.I. Basics of production technology and some applications of electro-explosive nanopowders of inorganic materials: technical sciences dr. disserattion: 01.04.07 / Lerner Marat Izrailevich – Tomsk, 2007. – PP. 325

22 Chace, W. G. Exploding wires / Plenum Press, New York Vol. 2 - 1962 – PP. 360

23 Burcev, V.A. Electrical explosion of conductors and its application in electrophysical installations / V.A. Burcev, N.V. Kalinin, A.V. Iuchinskiy – M.: Energoatomizdat, 1990 – PP. 289

24 Sedoy V.S., Some patterns of electrical explosions of conductors / V.S. Sedoy // Journal of Applied Physics, – 1976. – № 8. – P. 1707-1710

25 Kotov, Y.A. Energy and time characteristics of an LC circuit with an exploding conductor / Y.A. Kotov, V.S. Sedoy, L.I. Chemezova // Development and application of intensive beam sources (ed. by Mesyac A.G.) – Novosibirsk: «Nauka», 1976. – P. 61-69.

26 Qing Zhou. Effect of medium on deposited Energy in microsecond electrical explosion of wires / Qing Zhou, Qiaogen Zhang, Wenyu Yan, Xuandong Liu, Jun Zhang, Junping Zhao and Lie Pang // IEEE Transactions on Plasma Science – 2012. – Vol. 40. – № 9. – P. 2198-2204

27 Sedoy, V. S. Investigation of the breaking characteristics of electrically exploding conductors: technical sciences candidate dissertation: 05.14.12 / Sedoy Valentin Stepanovich. – Tomsk, 1975. – PP. 165

28 Yavorovskiy, N.A. Electrical explosion of wires – method of ultrafine powders producing: technical sciences candidate dissertation: 05.14.12 / Yavorovskiy Nikolay Alexandrovich. – Tomsk, 1986. – PP. 127

29 Glazunov, G.P. Some properties of fine powders are obtained by electric explosion of conductors in a high-pressure gas / G.P. Glazunov, V.P. Kancedal, L.A. Kornienko et. al. // Issues of Atomic Science and Technology – 1978 – №. 1(1) – P. 21-24

30 Research into nanoparticles obtained by electric explosion of conductive materials. Electronic material processing / V. Jankauskas, J. Padgurskas, A. Žunda, I. Prosyčevas. – 2011. – Vol. 47(2). – P. 79 – 85

31 Chang Kyu Kim / A novel method to prepare Cu – Ag core-shell nanoparticles for printed flexible electronics. Powder Technology / Chang Kyu Kim, Gyoung-Ja Lee, Min Ku Lee, Chang Kyu Rhee. – Vol. 263 (2014). – P. 1–6

32 Young-Soon Kwon / Ultra – fine powder by wire explosion method. Scripta mater // Young-Soon Kwon, Yong-Hun Jung, N.A. Yavorovsky, A.P. Illyn and Ji-Soon Kim. – Vol. 44 (2001). – P. 2247 – 2251

33 Austenitic Stainless Steels / Stainless Steels for Design Engineers. – ASM International, 2008 – P. 69-78

34 Gulyaev, A.P. Metallography / 1. Textbook for universities. 6th ed.- M.: «Metallurgy» - 1986. – PP. 544

35 Dutta, R.S, Gadiyar, H.S. The sensitization and stress corrosion cracking of nitrogen-containing stainless steels / Corrosion Science, 1993. - №34. – P. 51–60

36 Yap, C.Y. Review of selective laser melting: Materials and applications / C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh and S.L. Sing // Applied Physics Reviews – 2015. - № 2. – P. 101 - 116

37 Merkulova G.A. Metallography and heat treatment of non-ferrous alloys / Krasnoyarsk : SFU – 2008 – PP.312

38 Imaev R.M., Kaybyshev O.A., Salishchev G.Y. Mechanical properties of fine-grained intermetallic compound TiAl. Brittle viscous transition. / Physics of metals and metallography – 1991. - № 3. – P.179-187

- 39 Xinhua Wu, Hu D., Loretto M. H. Alloy and process development of TiAl / Material Science – 2004. – № 39. – P. 3935-3940
- 40 Kvarchava, I.F. Oscillographic determination of the energy of electrical explosion of wires / I.F. Kvarchava, V.V. Bondarenko, A.A. Plutto et.al. // Exp. and Theoretical Physics Journal – 1956. – Vol. 31 – № 5 – P. 745 - 751
- 41 D.B. Williams, C.B. Carter. Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science / Plenum, New York, 1996. – PP. 757
- 42 P Buseck, J. Cowley, L. Eyring (eds), High-Resolution Transmission Electron Microscopy and Associated Techniques / Oxford University Press, Oxford, 1998. – PP. 653
- 43 O.C. Wells, Scanning Electron Microscopy / McGraw-Hill, N.Y. – 1974. – PP. 782
- 44 C S Barren, T.B. Massalski, Structure of Metals / Pergamon, Oxford – 1980. – PP. 564
- 45 I.B Cohen, Diffraction Methods in Materials Science / Macmillan, N.Y. – 1966. – PP. 456
- 46 B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction / Addison-Wesley – 1956. – PP. 567
- 47 I.D. Noyan, J.B. Cohen, Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation / Springer-Verlag, Berlin – 1987. – PP.723
- 48 Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving: teaching aid / N.A. Gavrikova, L.R. Tikhvatulina, I.G. Vidyaev, G.N. Serikova, N.V. Shapovalova; Tomsk polytechnic university. – Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2014. – PP. 73
- 49 Regulatory documents of the planning and financial department of TPU - [electronic source] – access mode: <http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documents> – (Date of issue 26.03.2018)
- 50 GOST 12.1.003-74. Dangerous and harmful production factors. Classification. – M.: Standartinform, 2003. – PP.5

51 Sanitary rules and regulations SanPiN 2.2.4.548-96. «Hygienic requirements for the microclimate of industrial premises»

52 GOST 12.1.003-83. SSBT. Noise. General safety requirements. – M.: Standartinform, 2003. – PP.10

53 Hygienic requirements for electronic computers and work organization. Sanitary rules and regulations 2.2.2 2.4.1340 – 03. – M., 2003. – PP. 13

54 SanPiN 2.2.1/2.1.1.1278-03 – Hygienic requirements for natural, artificial and combined lighting of residential and public buildings

55 Calculation of artificial lighting. Methodical instructions for the fulfillment of individual assignments for full-time and correspondence students of all specialties. - Tomsk: TPU publishment, 2004. – PP. 15

56 GOST 12.1 SSBT. Electrical safety. General requirements and nomenclature of types of protection. – M.: Standartinform, 2001. – PP.5

57 GOST 12.1.038 – 82 SSBT. Electrical safety. Maximum allowable contact and current voltage levels. – M.: Standartinform, 2006. – PP.6

58 Rules for the installation of electrical installations. – M.: KnoRus, 2017. – PP. 488 – All the operating sections of the sixth and seventh editions, as amended and supplemented as of February 1, 2017

59 SNiP 21–01–97. Fire safety of buildings and structures. M.: Gosstroy, 1997. – PP.12

60 Federal Law of 21 December 1994. № 69 - F3. Fire safety

61 NPB 166-97. Fire fighting equipment. Fire extinguishers. Requirements for operation

62 GOST 12.1.004-91 SSBT. Fire safety. General requirements. I-1-1-95. – M.: Standartinform, 2004. – PP.11

63 GOST 12.1.030-81. Protective earthing, zeroing. – M.: Standartinform, 2008. – PP.5

64 The federal law of 22.07.2008 N 123-F3 (ed. at 13.07.2015) «Technical regulations on fire safety requirements»

65 GOST R ISO 26000-2012, A guide to social responsibility. – M.: Standartinform, 2012. – PP.12

66 SN 2.2.4/2.1.8.562-96. Noise in workplaces, in residential, public buildings and in residential buildings

67 GOST 12.1.002 – 84. Electric fields of industrial frequency. Admissible levels of tension and requirements for monitoring at workplaces. – M.: Standartinform, 2002. – PP.10

68 «The Labor Code of the Russian Federation» of 30.12.2001 N 197-F3 (ed. at 05.02.2018) [electronic source <http://www.consultant.ru>] – access mode: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34683/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/) – (Date of issue 29.03.2018)

## Приложение А

(Обязательное)

Раздел магистерской диссертации, выполненный на иностранном языке

### Impulse current generator parameters calculation

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Самарканов Фархат Жанатович		

Консультант – отделения материаловедения:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель, отделение материаловедения	Первиков Александр Васильевич	к.т.н.		

Консультант – отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель, отделение иностраннных языков	Квашнина Ольга Сергеевна			

## Theoretical foundation

3D printing, also known as additive manufacturing (AM), refers to processes used to create a three-dimensional object in which layers of material are formed under computer control to create an object. Objects can be of almost any shape or geometry and are produced using digital model data from a 3D model or another electronic data source such as an Additive Manufacturing file [1].

Additive technologies today is one of the most dynamically developing areas of so-called "digital" production. The classical and most accurate technology is the SLA-technology (Stereolithography Apparatus), or stereolithography refers to layer-by-layer curing of the liquid photopolymer by a laser. AM processes for metal sintering or melting (such as selective laser sintering, direct metal laser sintering, and selective laser melting) usually went by their own individual names in the 1980s and 1990s. Most metal parts are still produced by casting, fabrication, stamping, and machining, but by the mid-1990s, new techniques for material deposition were developed at Stanford and Carnegie Mellon University, including microcasting and sprayed materials [1].

In the last few years, metal 3D printing (layer-by-layer laser sintering, alloying) has become one of the most rapidly developing branch of AM technology. The development of this area of AM technology has also stimulated the development of metal powders production technologies.



Figure A.1 - Metal details made by 3D laser sintering [2]

Metal 3D AM helps producing special tools and original parts of complex configuration that are difficult or impossible to obtain by casting or machining. AM products are now used in a wide range of industries, from the automotive and aerospace industries to medical tools and household appliances. Technology continues to evolve.

The production of metal powders, despite the variety of methods, is the most laborious and expensive stage of the technological process. The physical, chemical and technological properties of powders, the shape of the particles depends on the method of their production.

Along with classical mechanical nanoparticles producing methods, methods based on impulse processes with high rates of change in the thermodynamic parameters of the substance are also used. One of such methods is the electrical explosion of a conductor (EEC). The EEC is realized when a current pulse passes through a metal wire with a density of  $(10^6-10^9) \text{ A/cm}^2$ .

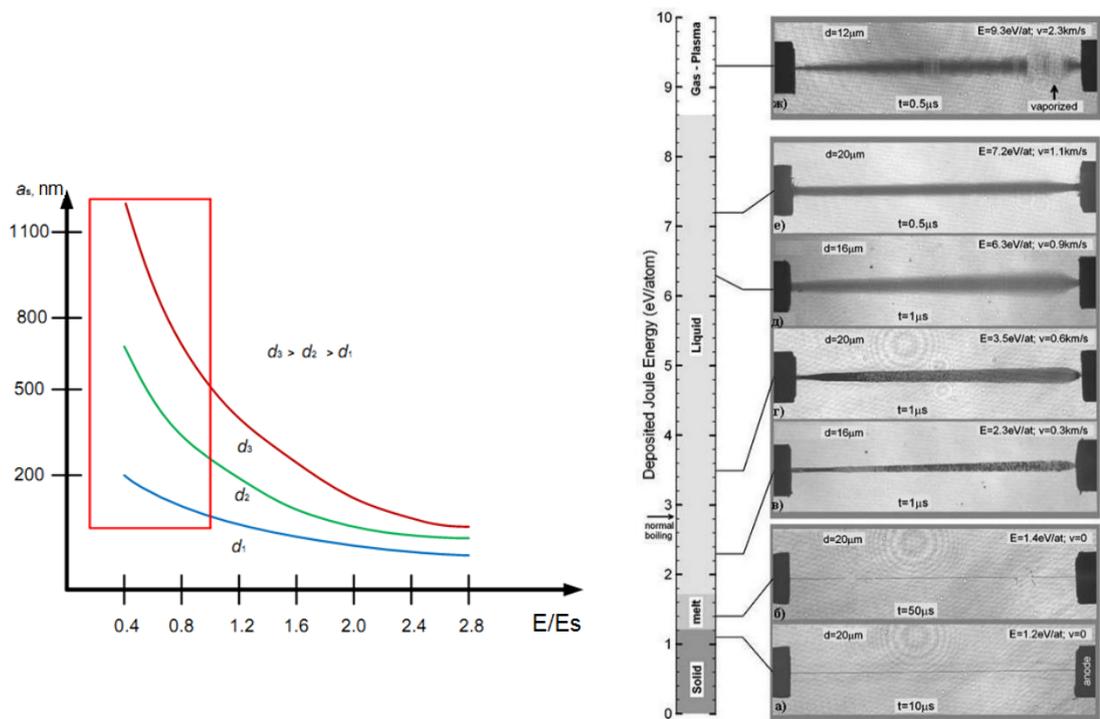


Figure A.2 - The influence of the energy introduced into the wire  $E$  and the diameter of the wire ( $d$ ) on the average particle size ( $E_s$  – sublimation energy of the metal) [3]

The wire heats up to the melting point, melts, and then explodes. When the products of the explosion expand into the gas atmosphere, nanoparticles are formed.

During the heating process, the wire substance sequentially undergoes a series of phase transformations. The phase state of the explosion products (gas / plasma or liquid) in the case of EEC is determined mainly by the amount of energy injected into the wire.

The mechanism of particle formation in EEC is also determined by the amount of energy injected into the wire. When amount of energy within the limits of the sublimation energy ( $E_s$ ) and less injected into the wire, the particles are mainly formed by the dispersion of the liquid metal.

At  $E > 1,5 \cdot E_s$ , the particles are formed as a result of vapor phase clusters coagulation. In the range of values between  $(1-1,5)E_s$ , the formation of particles follows two mechanisms. The mechanism of particle formation determines both the form of the particle size distribution function and the average particle size. There is specified range of particle sizes that can be used in additive technologies (nanosized and submicron sized particles) [3].

In most cases, an RLC circuit is used to realize the EEC in order to produce metals powders, alloys and their chemical compounds. This circuit is known as an impulse current generator (ICG).

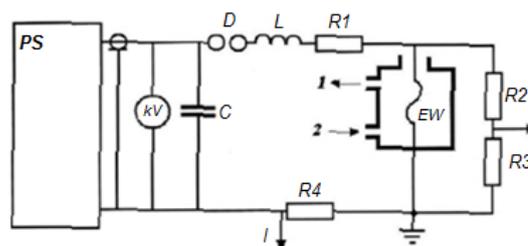


Figure A.3 – ICG circuit for nanopowder producing [3]

A impulse current generator (ICG) consisting of a high voltage power source (PS) and a capacitor bank C that forms a high voltage pulse (Figure 3) and the mechanical part, connected to the ICG through the cable entry and designed for the organization of EEC and collection of powder. PS charges the battery of capacitors C to the required voltage, the value of which is monitored by kilovoltmeter (kV). Energy

stored in capacitors being discharged to the exploding wire (EW) using discharger (D). Preliminarily, air from the chamber with EW is pumped out and filled with working gas (argon, xenon, hydrogen, etc.). The conductor explodes, the current pulses  $I$  and the voltages  $U$  are detected by the current shunt  $R4$  and the voltage divider  $R2, R3$ . The products of the explosion (nanopowder) are removed to the filter through the window 1 by the working gas flow, which enters through the window 2.  $L$  and  $R1$  are the inductance and the active resistance of the circuit.

During operation of the installation (Figure 4), wire 3 is fed from section 6 towards electrode 2. High voltage is applied to the wire and an explosion occurs. Under the influence of explosion energy, EEC products expand and begin their movement towards the cooler section 4. In section 4, the temperature of the explosion products is reduced to  $20^{\circ}\text{C}$ . The products of the explosion continue their movement in separator 5, where large particles are being separated. The wire continues to move, and the process repeats. Under the influence of the dynamic forces generated during the explosion of the wire and the predominant circulation of the gas flow, the explosion products continue to move along the installation contour and are being filtered in the filter 7, fall into the container 8. Then gas, mostly separated from the explosion products, enters

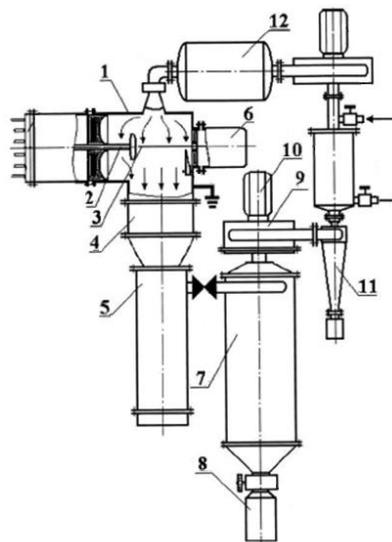


Figure A.4 – Basic installation design [3]

the cyclone 11. In a cycle, particles that have passed a filter are being collected. From the cyclone, gas passes the cooler 12 and returns to the explosion chamber 1. The fan 9 provides the necessary gas velocity in the installation.

The main methods to obtain nanopowders are mechanical grinding (ball and vibrating mills), liquid phase dispersion (spraying of water with high pressure) and based on the processes of evaporation and condensation. Compared to these methods electrical explosion of conductor method has several advantages:

1. The possibility of obtaining particles of metals with high physical and chemical activity, which cannot be provided by other technologies.
2. Energy costs are lower than in other methods known to us for the production of spherical metallic nanoparticles. This is due to the fact that in EEC technology, energy is injected into the metal impulsively and volumetrically, rather than from the surface, so the energy consumption for heating the environment is relatively low.
4. The possibility of fine and flexible control of the parameters of the technological process and thus the properties of the powders obtained.
5. Obtaining of a wide range of nanopowders of any metals and alloys that are produced or can be made in the form of wire or foil. In some cases, it is possible to blow molten metal jets.

EEC method has economic advantages too, due to low cost of equipment, its simplicity, and small weight and size of the equipment. The prices for aluminum powders (90-110 nm) for amount of 1 kg fluctuate between 540\$ and 586\$ whereas price for usual metal (aluminum) is approximately 2\$ per kilogram. [12,13]

## Chapter A1. Calculation of ICG parameters

To obtain nanopowder particles of metals that are applicable to 3D printing (particle size  $a_n \approx 100$  nm) and in large quantities, the following process parameters are usually used [4]:

- 1) Diameter of the exploding conductor  $d_0 = 0.20 - 0.5$  mm;
- 2) The relative energy content of the exploding conductor  $E/E_S = 0.5-2.5$  ( $E$  is the energy introduced into the conductor,  $E_S$  is the sublimation energy of the metal);
- 3) The pressure of the gas atmosphere in which the explosion occurs  $P = 300-500$  kPa;
- 4) The temperature of the gas atmosphere is  $T = (10 - 60)$  °C;
- 5) Explosion has to occur in so-called “fast explosion” mode. That means current density has to be  $j \geq 10^7$  A/cm<sup>2</sup> [5].

Thereby, summarized initial conditions of ICG performance:

Table A.1 – ICG performance initial conditions

Exploding wire parameters	Capacitor charging voltage	$E/E_S$
Material: Aluminum	$U = 30$ kV	2
Wire length: $l = 10$ cm		
Cross-section diameter: 0.5 mm		

### A1.1 Capacitance calculation

As mentioned above (Figure 3) ICG’s main parameters are inductance, resistance and capacitance. First, to calculate capacitance, required energy of capacitors needs to be calculated. Mass of the exploding wire:

$$m = \rho \cdot V = 2712 \cdot 19.634 \cdot 10^{-9} = 53248.425 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \quad (23)$$

where:  $\rho = 2712$  kg/m<sup>3</sup>;

$$\text{and } V = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l = 3.1415 \cdot 0.0625 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 19.634 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3.$$

For aluminum sublimation energy per weight is:  $E_S = 12$  kJ/g =  $12 \cdot 10^6$  J/kg [6].

Then required energy:  $W = m \cdot E = m \cdot 2 \cdot E_S = 53248.425 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 12 \cdot 10^6 = 1277.962$  J.

Therefore, required capacitance:  $C_G = \frac{2 \cdot W}{U^2} = 2 \cdot 1277.962 / 900 \cdot 10^6 = 2.839 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ .

Charge that passes the circuit:

$$Q_{\text{estimated}} = C_G \cdot U = 2.839 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 10^3 = 85.17 \cdot 10^{-3} \text{ C} \quad (24)$$

Chosen capacitor IK1-100-0,4 [14]:

Table A.2 – IK1-100-0,4 capacitor parameters

Nominal voltage $U_{\text{cap}}, \text{ kV}$	Capacitance $C_{\text{cap}}, \mu\text{F}$	Inductance $L_{\text{cap}}, \text{ nH}$	Body dimensions (length x width x height), mm
100	0.4	140	455 x 150 x 326

This capacitor on 100 kV was chosen for reasons of larger functioning recourse. Also several capacitors with a small capacitance have smaller inductance than one capacitor with large capacitance.

Capacitance of generator,  $\mu\text{F}$ :

$$C_G = C_{\text{cap}} \cdot N$$

Therefore, required number of capacitors:

$$N = \frac{C_G}{C_{\text{cap}}} = \frac{2.839 \cdot 10^{-6} \text{ F}}{0.4 \text{ F}} = 7.09 \approx 8$$

Then inductance of capacitors (parallel connection):

$$L_c = \frac{L_{\text{cap}}}{N} = \frac{140 \text{ nH}}{8} = 17.5 \text{ nH} \quad (25)$$

### A1.2 Inductance calculation

$$L_G = L_c + L_{\text{load}} + L_b + L_{\text{cab}} + L_{\text{cc}} + L_d + L_{\text{cb}}. \quad (26)$$

Inductance limit. Since explosion occurs in quick mode,  $j \geq 10^7 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ .

As far as  $j \approx \frac{I_m}{S}$ , then  $I_m \leq jS$ . Where  $S$  is cross-section area, and  $I_m$  is current amplitude.

$$I_m \leq 10^7 \cdot 10^4 \cdot \pi \cdot (0.25 \cdot 10^{-3})^2; I_m \leq 19.625 \text{ kA}$$

Amplitude of current [7]:

$$I_m = U \cdot \sqrt{\frac{C_G}{L_G}}; \Rightarrow L_G \leq \left(\frac{U}{I_m}\right)^2 \cdot C_G \quad (27)$$

Therefore, inductance limit:

$$L_G \leq \left(\frac{30 \cdot 10^3}{19.625 \cdot 10^3}\right)^2 \cdot 2.839 \cdot 10^{-6}; L_G \leq 6.634 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

Load inductance (aluminum wire) [8]:

$$L_{\text{load}} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot l}{r} - \frac{3}{4} + \frac{128 \cdot r}{45 \pi \cdot l} - \frac{r^2}{4 \cdot l^2} \right) \quad (28)$$

where:  $\mu_0$  – is magnetic constant;

$r$  – is radius of wire's cross-section;

$l$  – length of the wire.

$$\begin{aligned} L_{\text{load}} &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.1}{2 \cdot \pi} \left( \ln \frac{0.2}{0.25} - \frac{3}{4} + \frac{128 \cdot 0.25 \cdot 10^{-3}}{45 \pi \cdot 0.1} - \frac{(0.25 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 0.1^2} \right) = \\ &= 0.2 \cdot 10^{-7} \cdot (5.934 + 0.00226 - 1.562 \cdot 10^{-6}) = 1.1872 \cdot 10^{-7} \text{ H} = 118 \text{ nH} \end{aligned}$$

Assuming coefficient of ICG performance  $\eta = 0.45$ , then:

$$L_G = \frac{L_{\text{load}}}{\eta} = \frac{118 \text{ nH}}{0.45} = 262.3 \text{ nH}$$

Period of fluctuations [7]

$$T = 2\pi \sqrt{L_G C_G} = 2 \cdot 3.141 \cdot \sqrt{262.3 \cdot 10^{-9} \cdot 2.839 \cdot 10^{-6}} = 5.421 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (29)$$

Amplitude of current

$$I_m = U \sqrt{\frac{C_G}{L_G}} = 30 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{2.839 \cdot 10^{-6}}{262.3 \cdot 10^{-9}}} = 98.697 \cdot 10^3 \text{ A} \quad (30)$$

Capacitors connected in parallel connection by metal rectangular bus. Using handbook [9] the bus was chosen with following parameters:

$$l = 150 \cdot 10^{-3} \cdot 8 = 1.2 \text{ m}; b \text{ (width)} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}; c \text{ (thickness)} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m};$$

Capacitors connecting bus inductance [8]:

$$L_b = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \frac{2l}{b+c} + \frac{1}{2} \right); \quad (31)$$

$$L_b = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1200 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 1200 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-2} + 3 \cdot 10^{-3}} + 0.5 \right) = 1.235 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

Cable KVIS-100 with following parameters was chosen [10]:

Working voltage of impulse current: 100 kV. Current with a single pulse at  $t = 20^\circ\text{C}$ : 100 kA. Conductor material: copper. Cross-section area:  $25 \text{ mm}^2$ . External diameter of cable: 12.4 mm. Cable length:  $l = 5 \text{ m}$ .

Cable meets following requirements:

$$100 \text{ kV} \geq 30 \text{ kV};$$

$$100 \text{ kA} \geq 98.697 \text{ kA};$$

Cable inductance [8]:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \ln \frac{q}{p} + \frac{1}{4} \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \left( 1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{t}{q} - \frac{2}{15} \cdot \frac{t^3}{q^3} \right) \right]; \quad (32)$$

where  $q$  – internal radius of external wire;

$r$  – external radius of external wire;

$p$  – radius of internal wire.

$$t = r - q \ll q$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 0,999994 \approx 1;$$

$\frac{2}{15} \cdot \frac{t^3}{q^3}$  can be neglected, because the value is too small.

Thus, inductance of an individual cable:

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \frac{4.5 \cdot 10^{-3}}{2.8 \cdot 10^{-3}} + 0.25 + \frac{0.5}{3 \cdot 4.5 \cdot 10^{-3}} \right) = 0.761 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

Inductance of all cables:

$$L_{\text{cab}} = \frac{0.761 \cdot 10^{-6}}{8} = 0.095 \mu\text{H}$$

All cables connected to the cable collector which is built-in installation body.

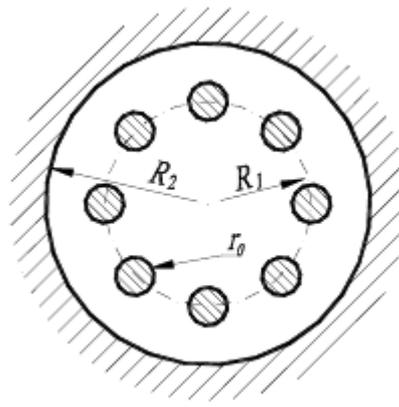


Figure A.5 – Dimensions of cable collector

Cable's external diameter  $r_0 = 12,4$  mm. Female screw M16 was chosen with diameter of 19 mm. Distance between the cables of 10 mm was left. Therefore, required area of cable collector:

$$S = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4} = \frac{8 \cdot 3.14 \cdot (19 + 2 \cdot 10)^2}{4} = 9551.8 \text{ mm}^2$$

Radius of collector:  $R_2 = \sqrt{\frac{9551.8}{3.14}} = 55.15$  mm. Distance between center of collector and center of cable:  $R_1 = \frac{55.15}{2} = 27.575$  mm.

Inductance of cable collector [7]:

$$L_{cc} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{R_2}{(n \cdot R_1 \cdot r_0^{n-1})^{1/n}} \quad (33)$$

$$L_{cc} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{55.15 \cdot 10^{-3}}{(8 \cdot 27.575 \cdot 10^{-3} \cdot (6.2 \cdot 10^{-3})^{8-1})^{1/8}} = 24.7 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

Discharger RVU-43-1 with following characteristics was chosen [11]:

Table A.3 – RVU-43-1 discharger parameters

Operating voltage, kV	0,5-45
Operating current, kA	5-400
Maximum charge per impulse, C	160
Dimensions:	
- diameter, mm	139
- height, mm	197

Discharger meets following requirements:

$$45 \text{ kV} \geq 30 \text{ kV};$$

$$400 \text{ kA} \geq 98.697 \text{ kA};$$

$$160 \text{ C} \geq 85.17 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

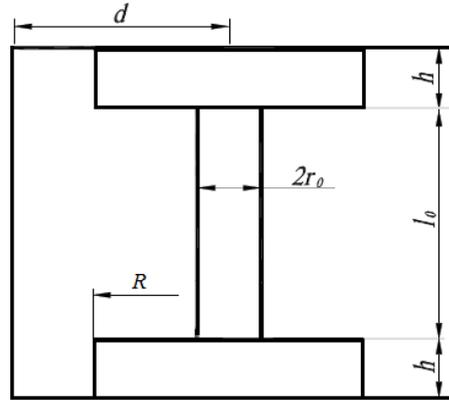


Figure A.6 – Dimensions of discharger

Inductance of discharger will be found by following formula [7]:

$$L_d = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ l_0 \left( \ln \frac{2 \cdot d}{r_0} + \frac{1}{4} \right) + 2h + 2h \cdot \ln \frac{2d}{\sqrt{(2R-h) \cdot h}} - 2R \ln \frac{2R}{2R-h} \right] \quad (34)$$

where  $r_0$  – radius of plasma channel in a moment of the first current maximum [9].

$l_0$  – length of plasma channel, distance between electrodes ( $l_0 = 1 \text{ cm}$ ).

$d$  – radius of discharger body.

$h$  – thickness of electrode.

$R$  – radius of electrode.

$$r_0 = 0.26 \cdot \sqrt[3]{I_m} \cdot \sqrt{\frac{3}{5} t_1} = 0.26 \cdot \sqrt[3]{98.72 \cdot 10^3} \cdot \sqrt{\frac{3}{5} \cdot 1.35 \cdot 10^{-6}} = 4.15 \text{ mm}$$

$$t_1 = \frac{T}{4} = \frac{5.421}{4} = 1.35 \mu\text{s}$$

Thus, inductance of discharger:

$$L_d = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left[ 10^{-2} \left( \ln \frac{2 \cdot 69.5 \cdot 10^{-3}}{4.15 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{4} \right) + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot \right]$$

$$\cdot \ln \frac{2 \cdot 69.5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{(2 \cdot 50 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}) \cdot 2 \cdot 10^{-2}}} - 2 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}}] = 21.023 \text{ nH}$$

Cylindrical metal bus, that connects cable collector, discharger and load. Material: copper, length  $l_{cb} = 110$  cm; Subtract height of discharger (197 mm  $\approx 200$  mm) and length of cable collector (50 mm), thus length:  $l_{cb} = 110 - 20 - 5 = 85$  cm. Radius:  $r = 2.25$  cm.

$$L_{cb} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot l}{r} - \frac{3}{4} \right)$$

$$L_{cb} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 85 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot \pi} \left( \ln \frac{2 \cdot 85 \cdot 10^{-2}}{2.25 \cdot 10^{-2}} - \frac{3}{4} \right) = 607.72 \cdot 10^{-9}$$

Recalculated total inductance with all known values:

$$L_G = L_c + L_{load} + L_b + L_{cab} + L_{cc} + L_d + L_{cb}$$

$$L_G = (17.5 + 118 + 1235 + 95 + 24.7 + 21.023 + 607.72) \cdot 10^{-9} = 2101.443 \text{ nH} \leq 6.634 \text{ nH}$$

- which does not exceed the inductance limit.

Recalculated period of fluctuations:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} = 2 \cdot 3.141 \cdot \sqrt{2.101 \cdot 10^{-6} \cdot 2.839 \cdot 10^{-6}} = 15.344 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Recalculated amplitude of current

$$I_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L_G}} = 30 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{2.839 \cdot 10^{-6}}{2.101 \cdot 10^{-6}}} = 34.873 \cdot 10^3 \text{ A}$$

### A1.3 Resistance calculation

Capacitors' resistance. Capacitors with paper insulation filled with oil have corpulence (Q-factor)  $Q = 10-12$ ,  $\text{tg}\delta = R_c \omega C \approx 0.08-0.1$ .

Resistance on a frequency  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  [7]:

$$R_c = 0.08 \frac{15.344 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi \cdot 2.839 \cdot 10^{-6}} = 68.84 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (35)$$

Load resistance:

$$R_{\text{load}} = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,027 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot (0.25 \cdot 10^{-3})^2} = 13.75 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Cylindrical bus resistance:

$$R_{\text{cb}} = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,018 \cdot 10^{-6} \cdot 85 \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot (2.25 \cdot 10^{-2})^2} = 9.624 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Resistance of cables:

$$R_{\text{cab}} = \frac{\rho \cdot l}{S \cdot n} = \frac{0,018 \cdot 10^{-6} \cdot 5}{\pi \cdot (2.8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 8} = 0.456 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Capacitor connecting bus (made of brass,  $\rho = 6.2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ) resistance [7]:

$$R_b = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{\mu_0}} \cdot \frac{L_{\text{cb}}}{c} \quad (36)$$

$$R_b = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 6.2 \cdot 10^{-8}}{15.344 \cdot 10^{-6} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} \cdot \frac{1.235 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-3}} = 41.375 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Plasma channel resistance [7]:

$$R_{\text{pc}} = \frac{l_0}{[4\pi\sigma^2/(\rho_0\xi)]^{1/3} \int_0^t i^{2/3} dt} = \frac{l_0}{[4\pi\sigma^2/(\rho_0\xi)]^{1/3} \cdot \frac{3}{5} I^{2/3} \cdot t_1} \quad (37)$$

where  $l_0$  – length of plasma channel.

$\sigma$  – electrical conductivity of plasma of spark gap [ $\sigma = (2.5-3) \cdot 10^4 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ] [7].

$\rho_0$  – density of gas in a discharger body (since it's vacuum,  $\rho_0 = 0.01 \text{ kg/m}^3$ )

$\xi$  – dimensionless coefficient (3.5 - 4.5).

$$R_{\text{pc}} = \frac{10^{-2}}{[4\pi(3 \cdot 10^4)^2/(0,01 \cdot 4)]^{1/3} \cdot \frac{3}{5} (34.873 \cdot 10^3)^{2/3} \cdot 1.35 \cdot 10^{-6}} = 1.76 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Thus, total resistance:

$$R_{\text{total}} = R_c + R_{\text{load}} + R_{\text{cb}} + R_{\text{cab}} + R_b + R_{\text{pc}} = 126.19 \cdot 10^{-3} \Omega$$

## Chapter A2. Results of circuit simulation

Main parameters of impulse current generator are calculated. Using LT Spice software, simulation of impulse current generator performance has been made.

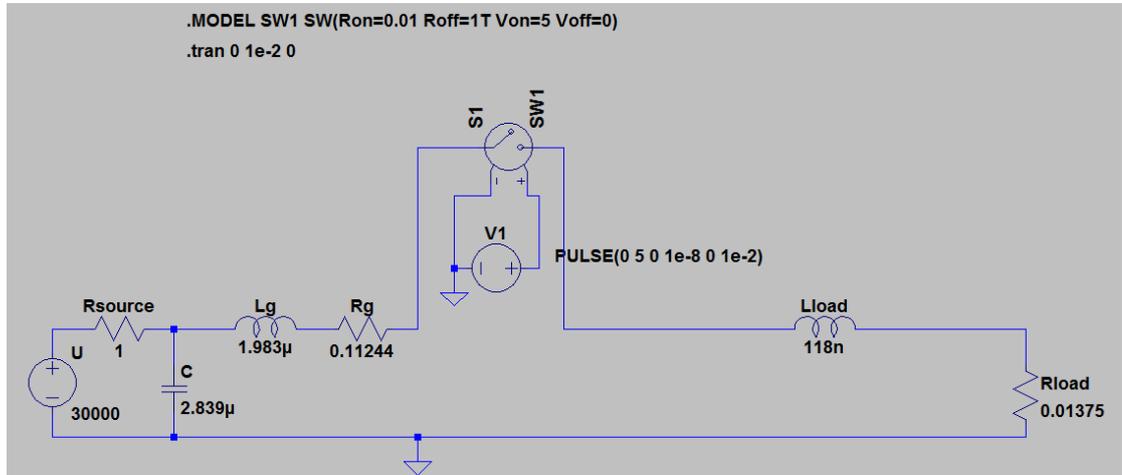


Figure A.7 – Scheme of ICG discharge circuit

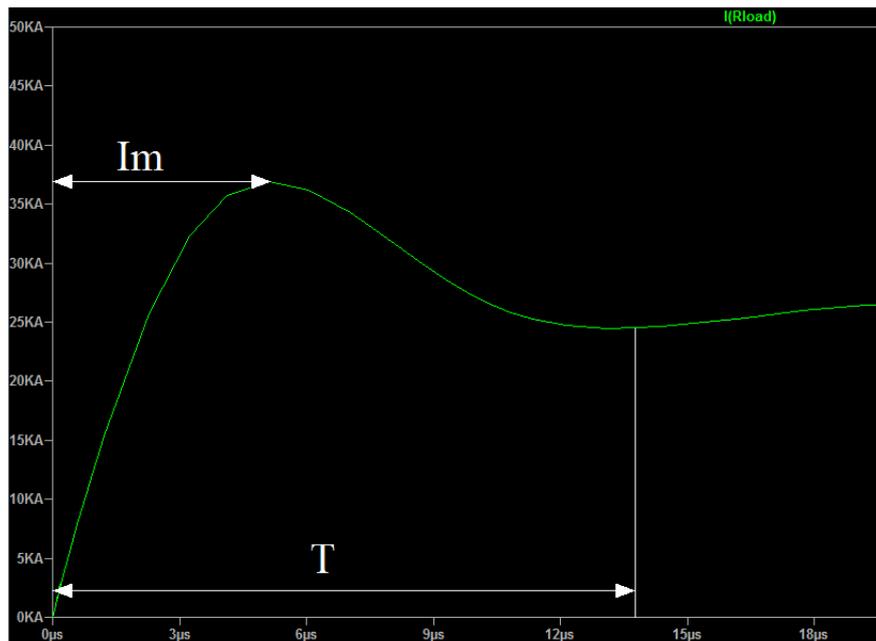


Figure A.8 – Characteristics of pulse current ( $I_m \approx 36$  kA,  $T \approx 13.5$   $\mu$ s)

## A2.1 3D model of installation body

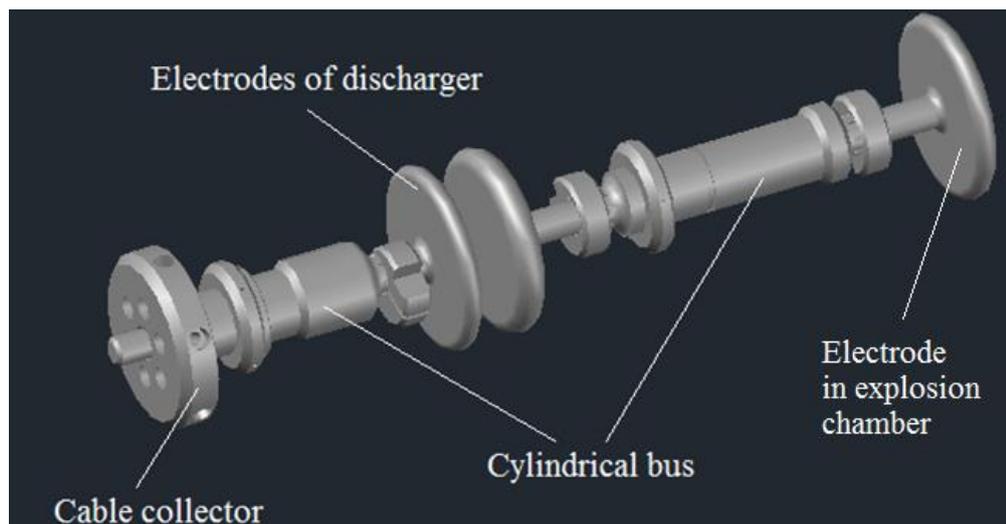
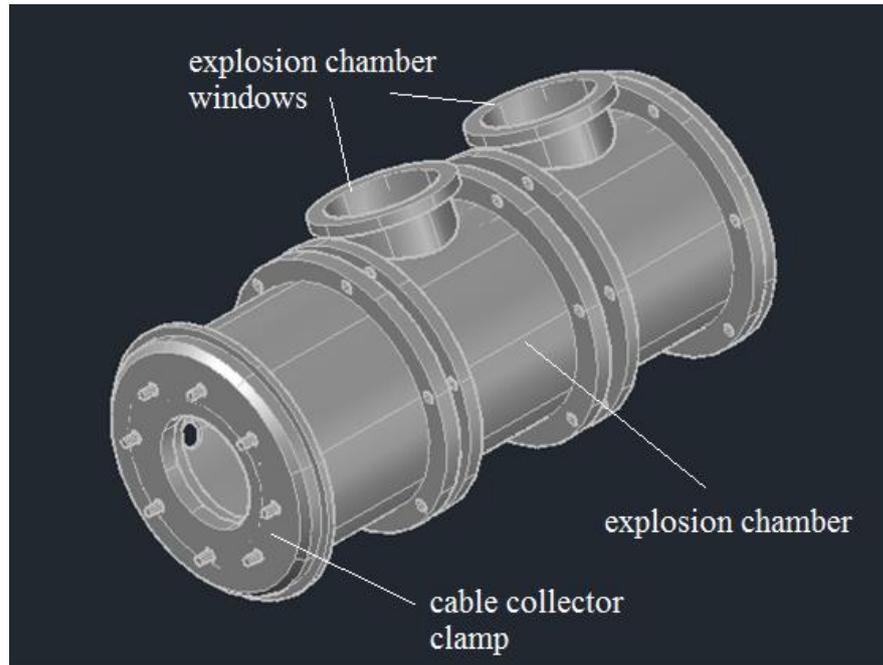


Figure A.9 – 3D model of installation body (external shell and internal components).

The external shell is made of several prefabricated parts. Explosion chamber with windows is the place where wire explosion occurs. Part of shelter with discharger in it and cable collector clamp which fixates the cable collector. Internal components are cable collector, which connects cables from capacitors with discharger. Discharger, which is used mainly to control discharge voltage. And cylindrical metal bus which connects all components with the explosion chamber.

## Conclusion

Nowadays impulse current generators are one of the perspective ways to obtain nanopowders of metals with following application of those powders in additive manufacturing. During accomplishment of the assignment parameters of impulse current generator has been calculated. Total capacitance  $C_G = 2,839 \mu\text{F}$ , inductance  $L_G = 2101,443 \text{ nH}$ , resistance  $R_{\text{total}} = 126,19 \text{ m}\Omega$ , period of fluctuations  $T = 15,344 \mu\text{s}$ , amplitude of current  $I_m = 34,873 \text{ kA}$ . Equivalent model of impulse current generator discharge circuit was designed in LT Spice software and circuit performance was simulated. Following results of simulation have been obtained:  $I_m \approx 36 \text{ kA}$ ,  $T \approx 13,5 \mu\text{s}$ , which do not differ much from calculated values. Also 3D model of installation body was made.

## Bibliography

1. Excell, Jon. «The rise of additive manufacturing» / The Engineer. [electronic source] [[https://theengineer.org/file/exj\\_31215](https://theengineer.org/file/exj_31215)]. Accessed May 24, 2017.
2. Direct Metal Laser Sintering. Stratasys direct manufacturing. [electronic source] [<https://www.stratasysdirect.com/solutions/direct-metal-laser-sintering>]. Accessed May 24, 2017.
3. Lerner, M. 2009. Production technology, characteristic, and some applications of electric-explosion nanopowders of metals. *Rus. nanotech.* 4: 6-18.
4. Pervikov, A., Lerner, M., Krukovskii, K. 2017. Structural characteristics of copper nanoparticles produced by the electric explosion of wires with different structures of metal grains / *Current Applied Physics* 17: 201-206.
5. Chace, W. G. 1962. *Exploding wires / Volume 2*. Plenum Press, New York. 360 pp.
6. Tang, W, Wang, D. 2011. The Sublimation Energy of Metal versus Temperature and Pressure and its Influence on Blow-off Impulse / *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*. Vol:5, No:9, 1492-1495.
7. Bocharov, Y. 2012. *Impulse current generators / Saint-Petersburg State Polytechnic university, - Saint-Petersburg*. 100 pp.
8. Kalantarov, P. 1986. *Inductance calculations / National Power Press*. Moscow. 488 pp.
9. Baumstein, I. 1989. *High voltage electrical installations handbook / National Power Press*. Moscow. 768 pp.
10. OKB KP – wires, cables, cable assemblies. Catalogue. [electronic source] [<http://www.okbkp.ru/en/catalog.pdf>]. Accessed May 25, 2017.
11. VEI-AVIS. Triggered vacuum switch RVU-43-1. [electronic source] [<http://vei-avis.ru/en/rvu-43-1.html>]. Accessed May 25, 2017.
12. Metal nanopowders and high technologies. Prices. [electronic source] [<http://www.nanosized-powders.com/en/prices/>]. Accessed June 2, 2017.

13. InvestmentMine. Aluminum Prices and Aluminum Price Charts. [electronic source] [<http://www.infomine.com/investment/metal-prices/aluminum/>]. Accessed June 2, 2017.
14. KVAR – Impulse capacitors. Catalogue [electronic source] [<http://kvar.su/katalog/kondensatory-silovye/kondensatory-impulsnye/>]. Accessed June 2, 2017.

**CD – диск**

«Определение параметров электрического взрыва проволок для получения однородных смесей микро и наночастиц сплавов 316L и TiAl»